イスカンダルへの航海で明かされる宇宙のしくみ

宇宙戦艦2199
SPACE BATTLESHIP YAMATO 2199

ヤマトでわかる天文学

半田利弘 著

ISBN978-4-416-11478-0
C0044 ¥1400E
9784416114780
1920044014001
定価 本体1400円 +税

宇宙戦艦ヤマト2199でわかる天文学
半田利弘 著

誠文堂新光社

『宇宙戦艦ヤマト2199』には最新宇宙論・天文学が散りばめてあった！

作品の科学考証担当の天文学者、半田利弘教授がヤマトに描かれた最新宇宙を語る。

宇宙戦艦ヤマトが地球からイスカンダルへ向った航路を辿り、太陽系のできかたから、太陽系外惑星など、本質的な天文学や最新の宇宙に迫る。

ワープ、波動砲といったヤマトファンなら気になる話も解説！

完全新作劇場映画『宇宙戦艦ヤマト2199 星巡る方舟』のエピソードも紹介！

イスカンダルへの航海で明かされる宇宙のしくみ
宇宙戦艦 2199
SPACE BATTLESHIP YAMATO 2199
ヤマトでわかる
天文学
半田利弘 著

宇宙戦艦2199
SPACE BATTLESHIP YAMATO 2199
ヤマトでわかる天文学
半田利弘著

はじめに

アニメ「宇宙戦艦ヤマト２１９９」、既にご覧いただきましたか？　これは、宇宙を舞台とした娯楽作品ですが、対象としている宇宙の広がりは他の多くのアニメと比べて桁違いに大きく、天の川銀河を飛び出し16万光年以上の彼方へと旅する話になっています。

本作品は特に、複雑に展開する人間ドラマが目を惹きます。様々な意図に基づいていろいろな行動をとる多数の登場人物。同じ時と所を共有したことで生じる、いろいろな衝突。これが「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の魅力であることは論を待たないでしょう。

とはいえ、宇宙好きとしては、その背景に登場する様々なシーンも、とても気になる点です。本書は、そんな皆さんのために、科学考証を担当した私が天文学や物理学の立場から背景事情を含めて紹介したものです。お気に入りのシーンはどんな科学的知見に裏付け

られているのか、どこからは想像なのか、それを知る一助になれば幸いです。

なお、本書は劇場やテレビで公開されたアニメのシーンなどを手がかりに、天文学者・物理学者の立場から行った解釈や予想を述べています。このため、今後、公開されるかもしれない「アニメの設定」と必ずしも一致するとは限りません。この点で、「アニメ設定資料」とは異なる立場で書かれていますので、ご留意下さい。

考えてみると、この立場は、観測を行っている天文学者と似ています。最新の望遠鏡を用いても、天体の正体や現象のしくみは、そう簡単にはわかりません。数多くの観測結果を集め、それに既に知られている物理学の知識を駆使し、時には大胆な仮定を加えることで、宇宙の謎を解明する。これが観測天文学の手法なのです。

公開されているアニメのシーンを観測結果だとすれば、本書のような、それに対する解釈は天文学研究と似たところがあると言えるでしょう。学術研究がそうであるように、同じ観測結果に対して異なった解釈が示されることは当然のことです。本書の解釈に疑問を持った方は、ぜひ、自説の発表を試みて下さい。昨今なら、インターネットで簡単に実現できますから。そのような方法でも「ヤマト」を、さらに「天文学」や「物理学」についての理解を深める。こんな楽しみ方に気付く人が増えるとよいなぁと思っています。

そうした観点で見た、地球からイスカンダルへの旅。長い航海の途中に登場する天体は、そこで遭遇する現象はいったいどんなものなのでしょうか。まずは太陽系から始めます。

いざ行かん、ヤマト抜錨(ばつびょう)！

第三章　星々の海へ……65

第四章　銀河の外へ……103

第一章
ヤマト×天文学

宇宙戦艦ヤマトとは…

時に西暦２１９９年。人類はガミラスという名の宇宙人からの攻撃を受け、地球環境は破壊され、絶滅の危機にさらされていた。残された時間は１年。そこへ、イスカンダルを名乗る宇宙人がやってくる。実は、その1年前、彼らの一人が地球を訪れ、画期的な技術「波動エンジン」を地球へと伝えていた。これを完成させ、搭載した恒星間宇宙船がヤマトである。地球人類として最初に建造した、光速を超える速度が出せる宇宙船である。

全長３３３ｍの艦体にはガミラスに対抗できる各種の武装がなされており、９９９人を乗せ、１年にわたり宇宙飛行を継続する能力がある。

ヤマトの目的地はイスカンダル。そこで、地球を復活させるシステムを受け取り、持ち帰るのが使命だ。しかし、彼の地は地球から16万８０００

宇宙戦艦ヤマト2199×天文学

光年。天の川銀河から飛び出し、隣の銀河である大マゼラン銀河にあるのだ。
彼我兵力差（ひがへいりょくさ）も桁違いのガミラスを相手に、ヤマトはイスカンダルへたどり着けるのか。システムを受け取った後、出発から1年という制限時間内に地球に戻ることができるのか。様々な試練を超え、ヤマトは行く。そして帰ってくるのだ。

　時に西暦１９７４年。これとほぼ同じ内容のアニメが日本のテレビで放送されました。その衝撃は当時の少年少女の心を強く打ち、アニメブームをもたらしました。それから40年、当時の思いを温めた人々は、あるいはアニメ制作者に、あるいは声優に、あるいはＳＦ作家に、あるいは天文学者になりました。それぞれの立場から当時の思いを昇華させ、新たな視点と技術で描かれたのが「宇宙戦艦ヤマト２１９９」です。

「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の舞台は、今からおよそ２００年後の宇宙です。人間の一生と比べれば、遠い将来ということもいえますが、宇宙の変化から考えると現在と同じといって差し支えありません。つまり、「宇宙戦艦ヤマト２１９９」で描かれる宇宙は、現在の宇宙そのものと言ってよいのです。

　とはいえ、アニメに描かれた宇宙は現在人類が知っている宇宙の姿そのものではありません。どこまでが現実（だと今の天文学者が思っている）なのか、どこからがアニメ制作者の想像なのかを示すことも場合によっ

ては重要です。この本では、そのような区別ができる手がかりを示してみました。

ヤマトでは、宇宙の姿ばかりでなく、宇宙を旅するための未来技術も描かれています。しかし、そのほとんどは現在の科学技術では実現していないものです。

例えば、ワープに相当する超光速航法は、現在の科学では、その手がかりすらわからないと言ってよい状況です。しかし、光より速く宇宙を旅したいと願う人がいる限り、人類はそれを実現しようと科学の力で努力を続けるでしょう。そして、あるいはよい方法を見つけるかもしれません。

夢は実現してこそ価値があるもの、そして不可能を可能にするのが科学の力なのです。

第一章
2199年、太陽系の姿

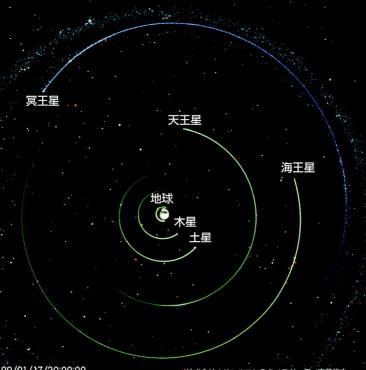
The Solar Sytem in 2199

時に、西暦2199年……太陽の周囲を8個の惑星と多数の小天体が巡っているのが太陽系。ヤマトの話もここから始まる。

火星にあるサーシャの墓碑銘

墓碑銘には西暦2199年1月17日と記されている。

地球は太陽の周りを巡っている惑星です。地球以外にも太陽の周りを巡っている惑星があり、それ以外にも多数の天体が太陽を巡っています。これらの天体を総称して太陽系と言います。

天体が太陽の周りを一周するのに要する時間を公転周期と言います。地球の場合、公転周期は1年です。しかし、他の天体はこれとは異なる公転周期で太陽の周囲を巡っています。例えば、火星は1・88年、木星は11・9年で太陽の周りを回っているのです。ということは、惑星の相互の位置は年により月日により常に変わっていることになります。とはいえ、幸いなことに、惑星の公転周期はほぼ完璧に一定であり、人類6000年の観測記録から、私たちはその値を極めて正確に知っています。太陽系の惑星の相互位置は、今や充分正確に予想することが可能です。

火星にあるサーシャの墓碑銘には彼女の到着が西暦２１９９年1月17日であると記されています。したがって、物語の冒頭は、２１９９年1月だとわかります。では、その時期の太陽系惑星の位置はどうなっているのでしょうか。現在の知識から、その配置を再現してみましょう。

宇宙戦艦ヤマトが地球を旅立つ２１９９年1月下旬、地球は太陽から見て、かに座の方向にあります。地球の公転周期は1年なので、毎年1月下旬には、いつもこの方向になります（14ページ参照）。逆に、地球からは太陽が、いて座とやぎ座の境目付近の方向に見えます。星占いで1月頃に生まれた人の星座が、やぎ座となっているのは、これを根拠としています。(ただし、そうだからといって星占いが科学的であることにはなりません)

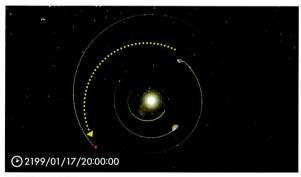
他の惑星はどうでしょうか。火星は太陽から見ると、いて座の方向にいます。つまり、太陽をは

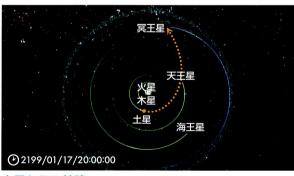
さんで地球と反対側に位置しているのです。火星で古代 進と島 大介を収容したキリシマが地球へと帰投する航路が司令部のパネルに示される際に、

太陽を横切っていることから気付いていた人もいることでしょう。

実は、この時、冥王星は太陽から見て、しし座

2199年1月17日の惑星の配置

地球からは太陽がいて座ややぎ座の方向に見える。火星は太陽から見ると、いて座の方向、木星、土星はやぎ座の方向にあることがわかる。

地球から火星

宇宙戦艦ヤマトは地球から火星へと向かった。

土星からの航路

ワープのトラブルで火星から天王星ではなく木星へ。土星はともかく、冥王星は反対側だ。

行くべきは土星か冥王星か。木星からの航路で古代（真ん中上）と島（左）は激論を交わす。

の方向にありました。しし座はかに座の東隣の星座です。つまり、太陽をはさんで冥王星と火星とは互いに反対方向に位置していたのです。このことを知っていれば、サーシャの宇宙船が火星を目指していた理由も理解できそうです。ガミラス艦隊を冥王星側に引きつけておき、太陽の裏側でランデブーを果たす、「メ号作戦」がどのように立案されたかがわかる気がします。

それでは、宇宙戦艦ヤマトが実際（？）に訪れた他の惑星はどうなのでしょうか。西暦2199年1月には、木星も土星も太陽から見てやぎ座の方向に位置します。それに対して、冥王星は先に述べたように、しし座の方向で、ほぼ正反対なのです。これを知っていれば、木星からの航路を巡って、古代や島らがどうして論争となったのかがよくわかることでしょう。

とはいえ、太陽系外に目を向けると、惑星の並び方を細かく論じる必要は無いのかもしれません。地球が太陽周囲を公転する軌道は1つの面をなし、これを黄道面といいます。太陽系の8惑星の公転軌道面はいずれも黄道面からの傾きが小さく、全ての惑星の公転軌道面は事実上この面と一致しているとして問題がありません。これに対して天の川銀河の大半の恒星がなす面、これを銀河面と言いますが、その面は黄道面からは大きく傾いており、その角は60度ほどにもなるのです。

さらには地球から見る大マゼラン銀河の方向は、そのいずれからも大きく離れていて、事実上、黄道面と垂直に近い方向になっているのです。宇宙を三次元的に見ると、黄道面は宇宙では極めて局所的な意味しか無い方向だったのです。

地球
Earth

ヤマトの出発地であり最終目的地でもある惑星。水の惑星とも呼ばれる人類にとって母なる星。

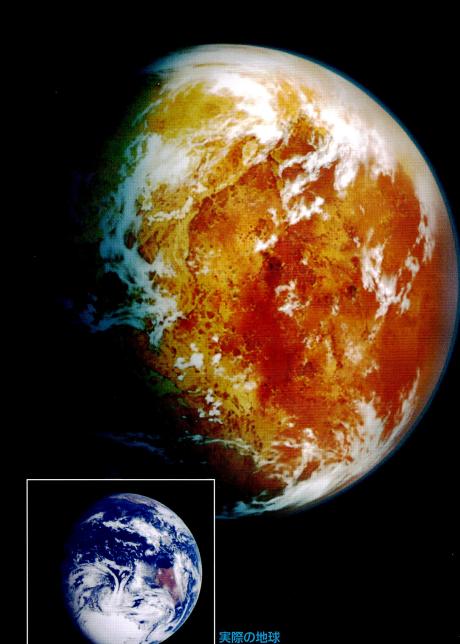
宇宙には数多の天体がありますが、その中で生命が存在することが確実な天体は地球しかありません。それには大量の水が液体として存在していることが大きな要因だと考えられています。

「地球は青かった。」人類ではじめて宇宙から地球を見たソビエト連邦（当時）の宇宙飛行士ガガーリンの言葉です。実際、宇宙からの画像を見ると、無数の白い雲が取り巻く青い地球の姿を目にすることができます。茶色の陸地、緑の森を見慣れていると、「なぜ青?」と思ってしまうかもしれません。青く見えるのは地球には広大な海があるためです。

地球は表面の約70%が海で覆われています。液体の水がこれほど広い面積を覆っている天体は太陽系には他にはありません。

これに対して、「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の冒頭で登場する地球は赤茶色にくすんだ天体として描かれています。ガミラスの遊星爆弾による攻撃で海が干上がってしまったからです。水がなくなったために、森も枯れ、茶色い不毛な大地が広がるだけの姿になってしまった…という設定です。

遊星爆弾が地表に衝突することで莫大なエネルギーが発生し全ての水が蒸発してしまったのでしょう。

実際の地球

NASA のガリレオ探査機が撮影した地球。

敵性植物

地球には毒素を放出する敵性植物が生え、人類が棲むには難しい環境となってしまった。

遊星爆弾

地球に遊星爆弾が落とされた様子。この遊星爆弾によって地球は一変した。

赤い死の星となった地球と宇宙戦艦ヤマト

人類の期待を背負って旅立つ、宇宙戦艦ヤマトの背景には干上がった地球が見える。

地球は宇宙で唯一、生命の存在が確認されている天体です。それには、広大な海があることが重大な原因となっているとする説が主流です。

水は身の回りにありふれた存在であるため、そのように感じることは少ないのですが、実は、かなり特殊な化学物質です。

液体の水には、他の液体には溶けないような多種多様な物質が溶けます。それらが水中で複雑な化学反応を起こすのです。このような特性を持つ液体は他にはないのです。

生命とは複雑な化学反応の結果で生じた物質に宿るものです。このため、海水に溶けた様々な分子が複雑な化学反応を起こすことが生命誕生に必要な条件と考えられているのです。

惑星として見ると、地球は岩石を主体とする天体です。このような惑星は太陽系には４つ存在します。地球はその中では最大で、直径

宇宙戦艦ヤマト帰還後の地球
コスモリバースシステムを受け取った後の地球。

1万2700km、質量は60垓（がい）t、60兆tの1億倍もあります。大気は窒素と酸素を主体としていますが、このような惑星は4つの中で地球だけです。

岩石惑星の大気は惑星ができた後、内部から染み出したガスが主成分だと考えられていますが、火星と金星の大気組成が似ているのに対して、地球だけが大きく異なるのです。特に、大気中に酸素が大量に含まれているのは地球だけです。

これは、植物が大気中の二酸化炭素を分解し酸素を放出したためです。植物によって大規模な大気汚染が起った結果が現在の地球と言うこともできるでしょう。

海が干上がり、地表の植物も壊滅的な被害を受けた場合、大気組成がどうなってしまうのか、遊星爆弾攻撃後の地球の様子は、コスモリバースシステムでどのように復元するのかも含めて科学的に深い議論が必要でしょう。

赤く輝く神秘の惑星。イスカンダルからの使者が不時着した惑星であり、山本玲の故郷。

火星は20世紀初めまで地球外生命の存在が最も期待された惑星です。望遠鏡の観測により技術文明の証拠があるとされたからです。しかし、その後の研究成果により、現在ではその可能性はないことがわかっています。

夜半にぎらぎらと赤く輝くこともある火星は、古来より多くの人々の目を惹いていました。この天体が地球と同じ岩石でできた惑星であるとわかると、コロンブスが見つけた新大陸からの連想もあってか、そこに人が住んでいると予想されるようになります。

19世紀の末、イタリアのスキャパレリがその表面に筋模様があることを発表。その単語が人工物を意味する「運河」と誤訳されたことから、火星には科学技術文明があると信じる人が急増します。

それから百年ほど過ぎた頃には、惑星探査機が火星に接近したり、着陸したりできるようになります。その結果、火星の「運河」は錯覚であったこと、大気は予想以上に薄く、人間はおろか、地球上の動植物に対応する複雑な生物もいないことがはっきりしました。しかしながら、地形や鉱物の組成などから、かつては大量の水があったことがわかってきました。

火星探査機による詳細な観測から、今では火星の詳細な地形図が作られ、多くの地名がついて

います。地球から望遠鏡で調べていた頃は、表面の模様が地形を反映していると予想されていましたが、探査機の調査結果は大きく異なり、模様は主に、表面の土壌の色を反映しているだけで、地形はそれとは大きく異なっている場合がほとんどであることがわかりました。例えば、火星の南半球にはほぼ円形に広がった明るい部分があります。ここは、その色から高地だと予想されヘラス大陸

実際の火星

NASA のハッブル宇宙望遠鏡にて撮影された画像。©NASA

東半球

北極砂漠
ユートピア平原
カッシーニ
アントニアディ
アラビア大陸
スキャパレリ
エリシウム山
イシディス平原
エリシウム平原
大シルチス高原
シュレーター
ティルヘナ大陸
ホイヘンス
ハーシェル
ヘスペリア高原
ノアキス大陸
ヘラス平原
シメリア大陸
ケプラー
セッキ
プロメタイ大陸
南極高原

西半球

火星の地形図

火星の高低を示している図。P23、P25 の宇宙戦艦ヤマト 2199 の画像だと、地形図の青の低地が海になっている。

と呼ばれていました。しかし実際には大規模な盆地で、今ではヘラス平原と呼ばれています。逆に、黒っぽい色から植物が生い茂る低地だと予想されていた大シルチスは盛り上がった起伏に富む地形で、今は大シルチス高原と呼ばれています。

火星の高地は起伏に富んでいるのに対し、低地は比較的平坦な平原になっています。高地には多数のクレーターが散在しているのに対し、平原にはあまりありません。顕著な地形としてはマリネリス渓谷とオリンポス

アルカディア
宇宙戦艦ヤマト2199にはアルカディアが登場する。
実際の火星のアルカディアの場所と少しずれている。

山が挙げられます。前者は、長さ３０００㎞、深さ８０００ｍもある巨大地形で、地球でも見られる地殻の裂け目だと考えられています。後者は太古に噴火した火山で、山頂は周囲から2万７０００ｍの高さになります。他にもいくつかの火山が見つかっています。これらは、既に活動を終えたと考えられていましたが、数百万年程度前に噴火した形跡があるとの説もあり、火山活動が再開する可能性も残されています。

地球は陸地が北半球に偏っていますが、火星は逆で北半球に広大な低地が広がっています。探査機が実際に着陸したクリュセ平原やユートピア平原があり、アルカディア平原という地名も実在します。

「宇宙戦艦ヤマト２１９９」に描かれている火星は一面が赤茶けた惑星ではなく、青い海が広がっていることに気付きます。公表されている実際の火星地形図と比べると低地が海になっていることがわかります。先に挙げたアルカディア平原もクリュセ平原もユートピア平原も「ヤマト２１９９」の世界では全て海の底になります。

作中ではガミラスとの戦争が始まる前に、地球人が惑星改造を行ったとの説明があります。海ができるほどの水をどのようにして調達したのかは定かではありませんが、例えば、ＥＫＢＯ天体（46ページ参照）や彗星の核を火星に落とすことで大量の水を火星表面にもたらせば、画面に登場したのに似た姿になるはずです。

架空

ワープ

Warp Drive

イスカンダルまでの想像を絶する距離を越え、星々の海を渡るために必要な技術。それがワープだ。

太陽系に最も近い恒星までても、そこへ行くには光の速さで約４年も掛かります。それより速く宇宙旅行するには、未知の技術を開発する必要があります。その一案がワープ航法なのです。

特殊相対性理論が正しいならば、全ての物体は自然法則で定められた一定の速度以下でしか運動することができません。この速度は、真空中を光

が伝わる速度と一致するため「光速」と通称しますが、光が伝わること自体が、その原因ではありません。

光の速さは秒速30万kmもありますが、それでも広大な宇宙を人間が旅するとしたら、あまりに遅いのです。そこで、光速を超える宇宙航法のアイディアが多くのSFに登場します。その代表がワープです。

ワープでは空間を人為的に歪めることで移動途中の距離を縮め実質的に超光速で移動します。このため、英語の「歪み」という言葉からワープといいます。途中の空間を飛び越えるという意味ではガミラスが用いている「ジャンプ」の方がわかりやすいかもしれません。

強い重力が働く時空は大きく歪んでいるため、これを利用できるのではという考えもありますが、具体的な方法はわかっていません。

初めてのワープテスト
イスカンダルからの技術によってできた波動エンジンを使って初めてワープした。

実在

特殊相対性理論

Special Relativity

現代物理学を象徴する物理法則。難しい理論と噂されるが、GPSでも利用されている現代科学の基礎知識。

特殊相対性理論は20世紀初頭に発見された物理法則で、特殊相対論と略すこともあります。量子力学と並び、それまでの常識を覆すものでしたが、多くの実験の結果、正しい予想をもたらす理論だと確かめられています。

19世紀から20世紀にかけて多くの物理学者が悩んでいた問題の1つが光の速さでした。地球は太陽の周囲を公転しているのだから、その進行方向

によって光の速さは異なると考えられるのに、どんなに精密な測定をしても、その効果が見つからないのです。

　しびれを切らせた物理学者ローレンツは、「運動によって全ての物質が伸び縮みしているために光速の違いが測れないのでは」と考え、そのようになっているには伸び縮みの法則はどうなっているのかと問題を逆に解いてみました。その答がローレンツ変換式です。

　しかしながら、そのような伸び縮みを示す物質についての法則を見出すことはできませんでした。そこで、「これは物質の性質ではなく、時空間の性質では」と考えたのがアインシュタインの特殊相対性理論なのです。

　光速度測定実験の矛盾を説明するために考えられた特殊相対性理論ですが、それを前提として数式を作り直してみると、それまでの日常経験に基づく結果からは予想できなかった結果が得られることがわかってきました。

　一定速度で進む乗り物から前方に何かを発射すると、発射された物体の速度は両者の速度の和になるというのが常識的な答です。しかし、ローレ

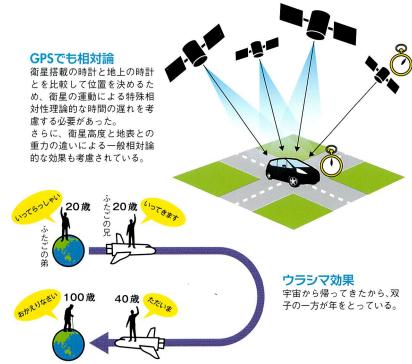
$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

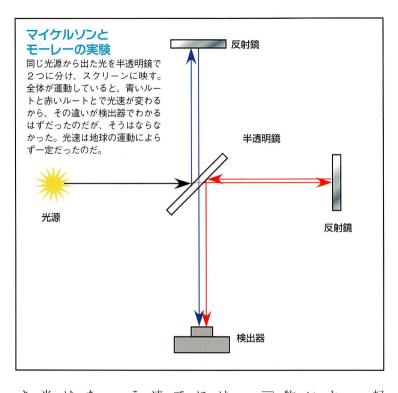
$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

ンツ変換式を用いると、厳密にはそうなりません。その違いは、速度が光速に近づくと顕著になります。どんなに高速の乗り物からどんなに高速で物体を発射しても、その速さは決して光速を超えないのです。この例からもわかるように相対性理論の下では物体は光速を超えて移動することは決してありません。

また、ローレンツ変換式では空間の長さが縮むだけでなく、時間の進み方も遅くなります。この結果、光速に近い速さで移動する物体では、時間の進み方が遅くなります。

この現象を昔話になぞらえて「ウラシマ効果」と呼びます。SFでは宇宙船で旅した主人公が地球に戻ると何百年も経っていたなどという話に使われます。実際、一定時間経つと別の種類の素粒子に変化することがわかっている素粒子を、加速器を使って光速に近い速さで運動させると変化が

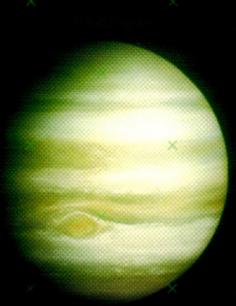
起こる時間が長くなることが観測されています。

他にも、様々な現象が、相対性理論で予想されるのと同じ結果をもたらすことが確かめられています。こうした裏付けがあるからこそ、多くの物理学者や天文学者は相対性理論が正しいものと「仮定」して、これを利用しているのです。

なお、相対性理論の話で注意する必要があるのは、ここで登場する光速とは光が伝わること自体には直接関係が無いということです。「この宇宙では時空の性質として、どこでも一定の値となる速さがあり、真空中の光速はそれと等しい」というだけなのです。

歴史的な経緯から、この「一定の値となる速さ」を光速と名付けているだけなのです。実際、光とは何の関係もない重力波と呼ばれる波も真空中の光速と同じ速さで宇宙空間を伝わるはずだと予想されています。

木星

Jupiter

地球の318倍の質量を持つ巨大ガス惑星。周囲を巡る4つの衛星はガリレオが発見した。

木星は太陽系最大の惑星です。表面を望遠鏡で観察すると縞模様が見えますが、これは雲がなす模様で、詳しく見ると毎日のように変化します。その下にも地球や火星のように硬い地面があるわけではありません。

木星はガス惑星の代表で、質量のほとんどが水素とヘリウムからなります。中心に近づくほど密度が高くなりますが、構成する物質の種類はほとんど変わりません。中心部には岩石の核がありますが、その質量は木星全体の数％程度しかないと予想されています。地球の11倍の直径がありながら、自転周期は10時間ほどと高速で、その遠心力のために赤道方向に膨らんだ形をしています。

望遠鏡で見ると赤道と平行な縞模様が目立ちます。これは木星の緯度ごとに分かれた気流が赤道と並行に流れているためだと予想されていますが、

実際の木星の画像

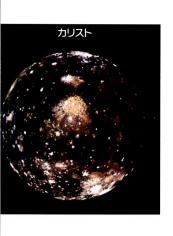
土星探査機「カッシーニ」が撮影した木星。土星に行く前に木星でスイング・バイを行った。木星の表面の真ん中より少し左下にある、黒い丸は木星の衛星のエウロパ。

木星のガリレオ衛星

木星に近い方からイオ、エウロパ、ガニメデ、カリストとなっている。

詳しいことはわかっていません。類似の縞模様は土星や天王星、海王星にも見られますが、木星のものが最も顕著です。縞模様の中や境目には多数の渦模様が見られ、その数や形は毎日のように変化しています。渦模様の中で特に目立つのが大赤斑と呼ばれるもので、直径が地球の数倍もあります。３００年以上にわたって存在し続けていると考えられていますが、どうしてここに渦ができているのかはよくわかっていません。

木星の表面から潜っていくと、物質の種類こそ変わらないものの、より上にある大気の重さで押しつぶされ、高い圧力となっており、水素も気体から液体となります。さらに、内側ではより強烈な圧力のため、水素が金属状になっていると推定されています。この〝金属水素〟は、圧力のために水素の原子核同士が水素原子の大きさよりも近づいた状態となり、周囲を回っていた電子が多数

木星のオーロラ
ハッブル宇宙望遠鏡が捕えた木星の北極と南極のオーロラ。紫外線で撮影。
©John Clarke (University of Michigan), and NASA/ESA

の原子核の間を自由に動き回れるようになった物質です。とはいえ、このような超高圧状態を地球上で再現することは現在の科学技術でも極めて難しく、どの程度の圧力になると水素が金属状になるのか、できた金属水素が本当に予想されるような性質を持つのかは確かめられていません。このため、木星の内部がどうなっているのかは未だ明確にはわからないという状況です。

地球は全体が南北に極を持つ磁石になっていますが、木星にも強い磁場があります。それに捉えられた太陽からの荷電粒子が強い放射線帯を作っていて、それが磁力線に沿って木星の南極と北極に達し、大気分子と衝突することでオーロラを生じています。この機構は地球でのオーロラと原理的には同じです。木星周囲の磁場の様子は捉えられた荷電粒子が磁場に影響されて運動する際に放つ電波によって地球上からも調べられています。

木星には多数の衛星が回っています。そのうち4個は特に大きく、いずれも月と同程度の大きさです。木星に近い方から、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストと名付けられていますが、4つをまとめてガリレオ衛星と呼ぶこともあります。

イオには活火山があり、内部から硫黄が吹き出しています。イオの軌道は楕円で、1周するごとに木星からの距離が変わります。このため木星から受ける重力の強さが変化し、イオ自体が変形することで生じた摩擦熱がエネルギー源だと考えられています。

エウロパは表面が氷で覆われた衛星です。その下には相当な深さの海があるのではと予想されていて、太陽系では地球外生命が存在する可能性が最も高い天体だと期待が持たれています。

ガニメデは太陽系の衛星の中で最も大きく、惑星である水星より大きい天体です。ただし、質量は水星より軽く、平均密度は1 cm³当たり2gしかありません。ガニメデも表面が氷で覆われています。ひび割れたような溝状の地形があり、土星の衛星であるエンケラドゥスと同じような地形だと考えられています。

カリストも表面が氷に覆われています。そこには多数の衝突痕が散在していますが、直径3000㎞にもなる巨大クレーターが1つあります。

架空

浮遊大陸

Floating Continent

木星大気中を浮遊している巨大な物体。表面を覆う植物は地球のものとは全く異なる。

ヤマトが初めてワープした先は予定とは異なり木星大気圏内でした。可視光では見通しが悪い雲の中で彼らが発見したのは巨大な岩盤状の物体。その大きさはオーストラリア大陸に匹敵するものでした。

作中で科学考証が最も難しいのが浮遊大陸の設定です。木星は、全体の平均密度ですら1cm^3当たり2g足らず。したがって、通常の岩石が普通に浮力で浮くことはあり得ません。大気圏内なので人工衛星のように公転運動で高度を維持するのも不可能です。よく見ると、浮遊大陸の端では川が滝として流れ落ちています。つまり、大陸全体は重力に逆らって浮いているのです。

一見、地球の熱帯雨林を思わせますが、大気組成や気温などは全く異なります。生えている植物を採集するためにヤマト乗員が艦外へ出た際には

浮遊大陸の全景
地球上の陸地のように見えるが、生えている植物はガミラスのものらしい。

浮遊大陸へ不時着するヤマト
オーストラリア大陸と同態度なら、面積は日本全土の20倍以上になる。

泡のようなものが見えていました。とすると、大陸の周囲は液体で包まれていたのでしょうか？
　これらを総合すると、この物体は人工的なしくみで浮かんでいると推測できます。補給基地と言っていますが、ガミラス人はここで何をしていたのでしょうか？　これが一番の謎かもしれません。

架空

波動砲

Dimensional Wave Cannon

ヤマト本体が砲となっている必殺兵器。浮遊大陸を一撃で破壊する威力を持つ。

正式名を次元波動爆縮放射器といい、ヤマトの切り札と言うべき兵器です。波動エンジンがエネルギーを得る原理を応用し、地球人が独自に開発した兵器とされています。作中でも限られた場面でしか使われていません。

動作原理ついて番組中でなされている簡単な説明を解釈すると、「時空が本来持つ11次元のうち我々が時間や空間として認識できる4つ以外の次元を使って前方の時空を歪めることで、そこに超小型のブラックホールを大量に作り出す。これが量子力学的効果によって発する強い放射で、その範囲にいる敵を蒸発させる」となります。

ブラックホールの内部からは光も物質も出てくることはできません。一方、宇宙空間は真空であっても常に揺らぎがあり、極めて短い時間に正負のエネルギーを持つ粒子の組が生じては消えていま

す。この時、負エネルギーの粒子がブラックホールに取り込まれると正エネルギーの粒子が取り残され、これがブラックホールから出てくることになります。指摘した科学者にちなんで、この現象をホーキング放射と呼びます。質量が小さなブラックホールほど激しい放射を起こすと予想されており、それを応用したわけです。

ターゲットスコープ
浮遊大陸を波動砲で狙う。

波動砲で粉砕された浮遊大陸
想像を絶する威力に沖田艦長はむしろ畏怖を感じる。

架空

波動防壁

（次元波動振幅防御壁）

Quantum Wave Barrier

ヤマトを守る防御兵装。第3艦橋から制御する。20分間程度しか持たないのが弱点。

波動エンジンの動作原理を応用して作ったとされています。ただし、作中では詳しい説明がないため、波動砲以上に科学的知識を想像力で補う必要があります。量子力学や場の量子論と関係があると私はにらんでいます。

量子力学とは、相対性理論と並ぶ20世紀初頭に急速に発展した物理学の理論です。物質の微細構造や光と素粒子の相互作用を調べてみると、物理現象の状況に応じて、光も物質も波動と粒子の性質を示すことがわかりました。これをうまく説明するために考えられたのが量子力学であり、それを発展させたのが場の量子論です。

波と粒子とを両立させるために、量子力学では粒子はその位置を確率的にしか予想できず、その確率は波動方程式で計算できる確率振幅に従うとしています。この考えは原子や素粒子の世界では

多数の非常識な結論を導くのですが、そのいずれもが実験で確認されており、今ではそれを利用した技術が主として電子工学で多用されています。

波動防壁は、この原理を何らかの形で応用していると思われます。ヤマト周囲の空間の量子力学的性質を変化させ、攻撃兵器の威力を確率的に回避するのではと思います。

波動防壁の制御盤
正式には次元波動振幅防御壁といい、第３艦橋から制御する。

エンケラドゥス

Enceladus

SOSが発信され、コスモナイト90の鉱山がある土星の衛星。そこに眠るはいずこの船か。

直径500㎞ほどの土星の第2衛星です。もっと内側を巡る衛星が12個もありますが、番号を付けた時点ではミマスしか見つかっていなかったので第2衛星になっています。表面は氷結していて、ひび割れ状の模様が走っています。

エンケラドゥスの表面の模様は、氷に入った割れ目で、そこから内部の水や水蒸気が噴出し、浸みだしていると考えられています。表面重力は地球の85分の1しかありません。希薄な水蒸気の大気があり、これは割れ目から噴出した水が原因でしょう。

噴出活動のエネルギー源はわかっていませんが、木星の衛星イオと同じく軌道運動に伴う潮汐摩擦や、地球と同じく内部での放射性物質の崩壊熱などが考えられます。

氷の層の下に溶けた水が大量にあるということ

は、そこで複雑な化学反応が進み、生命が誕生している可能性を期待させます。現在は、種々の都合を考慮して、木星の衛星エウロパに注目が集まっていますが（33ページ参照）、エンケラドゥスにも地球外生命がいるかもしれません。

なお、土星には、もっと大きい衛星タイタンがあり、こちらには表面気圧が1・5気圧にもなる大気があります。

エンケラドゥス

土星の衛星エンケラドゥスの実画像。

©NASA

実在

Pluto

太陽系外縁部にある準惑星。粘り強い観測の末で発見されたこの天体の名はギリシア神話に由来。

太陽系の最も外縁側にある孤独な天体の印象で語られる天体ですが、発見から62年を経て仲間が続々と見つかり、今では、その筆頭の地位を占めています。太陽系には惑星以外にも多くの星があることを象徴する存在です。

ハーシェルが天王星を発見し、その軌道運動を理論的に解析した結果、１８４６年に海王星が発見されるに至り、より外側で惑星を探す機運が盛り上がりました。特に、１９０５年からローウェルが始めた観測計画は彼の死後も続けられ、１９３０年にローウェル天文台のトンボーが発見しました。

冥王星の名は、ギリシア・ローマ神話に詳しい英国の少女の提案に基づき、それを野尻抱影が意訳したものです。

太陽系の８大惑星は互いの公転軌道面がほぼ揃っていますが、冥王星は20度ほど傾いており、太陽からの距離が1・5倍以上も変わるなど、８大惑星とは著しく異なる特徴を持っています。このため、発見当初から、「惑星とはいえ例外的」との扱いを受けていました。

冥王星の特徴と似た天体が海王星軌道より外で数多く見つかるようになると、冥王星を「例外的な惑星」とするよりも、新グループの代表と考えようとする意見が強くなります。こうして、今では惑星の末席から太陽系外縁天体の筆頭と扱われるようになったのです。

冥王星に接近した探査機は２０１４年の時点では、まだ1機もありません。このため、その表面の詳細な写真はまだ得られていませんが、地球からの観測で表面に顕著な模様があることがわかっています。その正体は完全にはわかっていませんが、表面を覆っている物質が異なるためと予想さ

実際の冥王星

ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された冥王星の画像。

ⓒNASA/JPL

冥王星の軌道

軌道が
8大惑星と違う

太陽系の惑星の軌道

冥王星の軌道

黄道面から見ると、冥王星の軌道だけが大きく傾いている。

ⓒ 株式会社オリハルコンテクノロジーズ　高弊俊之

冥王星とカロン
冥王星とカロンと他の２つの衛星。
ⓒH. Weaver（JHU / APL）, A. Stern（SwRI）, and the HST Pluto Companion Search Team, ESA, NASA

れています。表面温度は零下２００℃以下で、水はもちろん、地球上では気体である窒素やメタンの氷で覆われています。したがって、反射衛星砲の攻撃を受けたヤマトが没する海は水ではなく、液体窒素や液化メタンであろうと思われます。だとすると、艦内に溢れた水は凍結して破れた配管から出た循環式冷却水でしょうか。

冥王星には大きな衛星カロンがあります。カロンは冥王星の7分の1の質量を持つ衛星で、主星と比べて巨大な衛星です。このため、冥王星自体がカロンの重力の影響を受けて動いており、カロンが冥王星の周りを回っているとは言いがたい状況になっています。このため、この2つの天体を二重惑星と呼ぼうという提案がされたこともありました。イスカンダルとガミラスとが2重惑星だったという設定が、40年前の「宇宙戦艦ヤマト」で提示されていたことを考えると、この提案は「ヤマト」の影響を受けたものかもしれません。

月はいつも同じ面を地球に向けていますが、これは月と地球とが互いの重力で影響し合っている結果として説明ができます。冥王星とカロンも互

ガミラス冥王星前線基地から見えるカロン

基地から見られるカロンがきちんと描かれている。

いに重力で強い影響を与えているため、冥王星は常に同じ面をカロンに向けています。同時に、カロンも常に同じ面を冥王星に向けています。つまり、冥王星から見るとカロンの模様はいつも同じであり、冥王星上のある場所からはカロンが見える向きが常に同じだということになります。この知識を用いれば、カロンが見える向きから、自分が冥王星上のどこにいるかを推定できることになります。

「宇宙戦艦ヤマト2199」では、ガミラス冥王星前線基地のシーンで背景にカロンとおぼしき天体が描かれています。ここから基地が冥王星のどこにあるのかを、かなり絞り込むことができるので、このような映像は極秘事項になっていたはずです。基地の責任者であるシュルツ司令官からは、基地勤務者全員に対して風景写真撮影を禁止する指令が出ていたに違いありません。

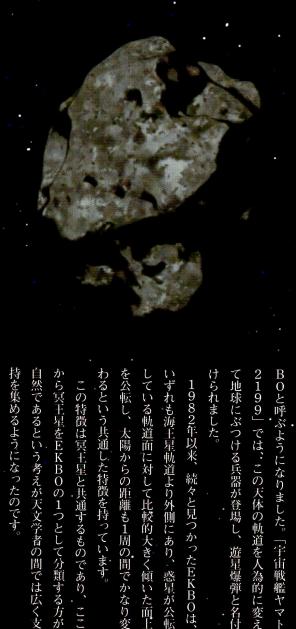
EKBO

エッジワース・カイパーベルト天体。太陽系外縁部に散在する小天体。太陽系の過去が冷凍保存されている。

海王星軌道の外側には小型の天体が多数あります。存在を予想した2名の天文学者にちなんで、この名で呼ばれます。ほとんどが塵で汚れた雪玉のような天体だと考えられています。

太陽系の天体を距離と重さを考慮して内側から順に見ていくと、海王星から外側に冥王星しかないのは、あまりに唐突である……。こうした考えを持ったのがエッジワースとカイパーです。彼らは海王星の外側には観測しにくい暗くて小さな天体が大量に存在するのではないかと予想したのです。

冥王星の重さの見積もりが当初の予想よりだいぶ軽いとわかってくると、この説は次第に説得力を持つようになり、該当する部分は本当に天体がないのかを徹底的に探す気運が盛り上がってきました。

こうして1982年に最初の天体が実際に発

見されて以来、続々と見つかるこの類いの天体をエッジワース・カイパーベルト天体、略してEKBOと呼ぶようになりました。「宇宙戦艦ヤマト2199」では、この天体の軌道を人為的に変えて地球にぶつける兵器が登場し、遊星爆弾と名付けられました。

1982年以来、続々と見つかったEKBOは、いずれも海王星軌道より外側にあり、惑星が公転している軌道面に対して比較的大きく傾いた面上を公転し、太陽からの距離も1周の間でかなり変わるという共通した特徴を持っています。

この特徴は冥王星と共通するものであり、ここから冥王星をEKBOの1つとして分類する方が自然であるという考えが天文学者の間では広く支持を集めるようになったのです。

誤解している人も多いようですが、冥王星を惑星として扱うかという議論の際にも、冥王星は他

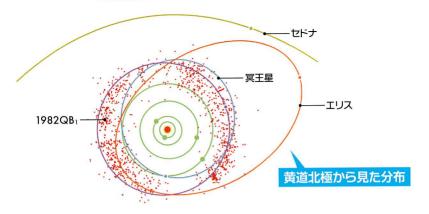
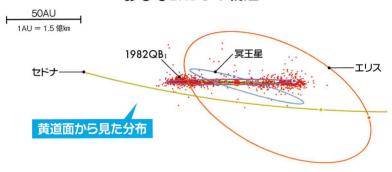
の惑星とは異なる性質を持つというのはほとんどの天文学者に共通した認識であり、単にどこまでを惑星と呼ぶかが争点となっただけでした。

詳しく調べてみると、ＥＫＢＯは軌道の特徴で3種類に分けられることがわかっています。

1つは、海王星の公転周期の1・5倍公転周期を持つもので、冥王星もこれに当てはまります。海王星が3回公転する間に2回公転するので、該当する494年ごとに相互の配置は同じになります。この結果、冥王星は海王星に近づくことがないのです。この状況は海王星の重力の影響で冥王星の軌道が変わったためだと予想されています。

もう1つは、海王星軌道より割と外側をほぼ円軌道で公転している一群です。最初のグループは、ここに属していた天体が海王星の重力の影響で移動したのだと推定されています。この一群は太陽系ができる際に惑星になれずに小さいまま残った

おもなEKBOの軌道

天体だと考えられます。１９８２年に発見された１９８２ＱＢ１やエリスなどがこのグループに含まれます。

最後の１群は、海王星軌道付近まで近づくことはあるものの、そこからずっと遠くまでいく軌道を回っている天体です。これらも先の一群から惑星（主として海王星）の重力によって軌道が変わってしまった天体だとされています。

ＥＫＢＯは、いずれも石質や煤状の細かい塵と水などが凍った氷との混合物と考えられています。これは彗星の核とほぼ同じ組成です。ＥＫＢＯのような天体が惑星などの重力によって軌道が変えられ、太陽の近くまでたどり着くようになると、氷が溶けて気化し、ガスと塵を放出して華麗な尾を作り、彗星となるのです。

架空

遊星爆弾

Planet Bomb

ガミラスの長距離爆撃兵器の1つ。その材料はEKBO。地球を赤い星に変えた悪魔の兵器だ。

ガミラスが冥王星から落としていたのが遊星爆弾です。単に地球に衝突するだけなのですが、地球上で見れば巨大な物体であるため、その運動エネルギーが破壊力をもたらし、巻き上げた塵などが地球環境を破壊します。

ＥＫＢＯのほとんどは海王星の軌道より内側にはあまりやって来ませんが、力を加えれば、軌道が変わり、うまく狙えば地球に衝突することもあり得ます。ガミラスの冥王星前線基地では、光線砲によってＥＫＢＯの表面を加熱し、蒸発して吹き出したガスにより公転運動を減速させ、太陽の重力に引かれて太陽の近くまで達する軌道に変える作業を日常的に行っていました。

もっとも、公転速度を止め、太陽に落ちるに任せるのでは地球近くまで達するのに、90年近くを要することになります。ガミラスの攻撃は数年前

から始まったと語っていますから、これでは間に合いません。時間短縮のためには積極的に太陽方向へ押す必要があるのです。実際、地球の冥王星探査機ニューホライズンは出発から9年後に冥王星付近を通過します。これには途中の惑星の重力を利用した加速が使われています。遊星爆弾も、この技術を用いているのでしょう。

EKBOを遊星爆弾に
光線砲によって EKBO の軌道を変え、地球に向かわせる。

架空

反射衛星砲

Reflective Satellite Cannon

ガミラスの冥王星前線基地にある光線砲。しかし、本来の目的は遊星爆弾の発射装置だ。

ガミラスの冥王星基地から発射された光線砲は、ヤマトをあらゆる方向から攻撃することができます。「死角なき」、この兵器は発射装置と反射衛星の組み合わせで構成されています。光線兵器ならではのシステムといえます。

反射衛星砲は、ＥＫＢＯを加熱して気化したガスが噴出することで、その軌道を変え、遊星爆弾として発射するための装置です。地球に衝突させるには、基地から直接見ることができないＥＫＢＯでも狙える必要があります。ＥＫＢＯの破壊ではなく加熱が目的だと考えると砲弾を撃ち込む必要はなく、エネルギー光線を当てれば目的は果たせます。

そこで、冥王星周囲に多数の人工衛星を飛ばし、それに搭載した反射鏡で光線を反射する方法が考えられました。

反射衛星からヤマトに放たれるエネルギー

反射衛星を中継して、あらゆる方向からヤマトを撃つ。

これでヤマトをあらゆる方向から攻撃したのです。元々は異なる目的で作られたものでも、必要に応じて転用して成果を挙げる、この点で冥王星前線基地のシュルツ司令はかなりの傑物だといえます。だからこそ、冥王星基地を任せられていたのかもしれませんが、彼を重用できなかったところがガミラス軍の最大の弱点だったのかもしれませんね。

実在

原始惑星系

Proto Planet System

次元潜航艦の攻撃を避けヤマトが潜んだ天体。
そこは、惑星ができつつある星系だった。

異次元の世界に潜む次元潜航艦からの姿なき敵の攻撃におびえるヤマトの乗組員。真田副長は近くの原始惑星系に逃げ込むことにしました。そこは星間物質が集まる領域で、多数の微惑星が敵の目から守ってくれるのです。

太陽のような恒星は宇宙に多数存在します。その周囲にも惑星が巡っていると期待できます。実際、2014年11月現在、太陽系外の恒星を巡る惑星は、1800個以上見つかっています。それればかりではありません。全ての恒星が同時に形成されたのでなければ、最近できたばかりの惑星系が現在も存在するはずです。ヤマトが潜んだ原始惑星系は、そうした天体の一つです。

太陽系の惑星は、ほぼ同じ平面上を同じ向きに、おおむね円軌道で巡っています。彗星や小惑星には、これと大きく異なる軌道を巡っているものも

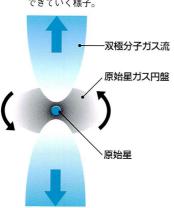
多数あることを考えると、この一致には理由があるはずです。太陽系の惑星は回転する濃いガスと塵の円盤から形成されたというのが現在の定説です。

「宇宙戦艦ヤマト2199」の資料では、この天体を「原始恒星系」と表記したものもありますが、これは「複数の原始恒星からなる星団」という意

実在する原始惑星系
オリオン星雲を背景に影絵のようにして見つかっているものもある。

ガスから原始星
ガスが公転し、原始星と塵の円盤ができていく様子。

双極ガス流
原始星の周囲の構造。

味ではありません。太陽が1個しかなくても太陽系というように、1個の原始星とその周囲を巡る多数の天体を総称して「原始恒星系」と呼ぶのです。

恒星は星間空間に漂うガスと塵が自らの重力で集まり、収縮した結果できます（60ページ～64ページ「太陽系のでき方」参照）。このとき、集まってきた物質が全て恒星となるわけではありません。集まる前のガスは内部で運動しているからです。

洗面台に水を溜め、栓を抜くと渦ができます。このとき、水の動きをよく見ると、穴の回りを回転していることがわかります。このように、物質に対して1点に集中するような力が働いても、その周囲をぐるぐる回るだけとなることはよくあります。この現象を物理学の法則では角運動量が保存されるためと説明します。地球が月を引っ張っていても地上に落ちて激突しないのは、物体にこの性質があるからです。

原始星ができる際にも、この現象のために、集まってきたガスは原始星に直接落ち込まず、その周囲を公転するのです。その際に、ガス同士は広がっているために衝突して運動が平均化します。この過程が続くとやがて原始星の周囲には、ほぼ円運動で回転するガスと塵の円盤ができます。

集まってきたガスの一部は、円盤部のガスが原始星へ落ち込む際に、それから力を受けて、円盤の回転軸方向、上下両側に加速されジェット状に

大型の微惑星の陰に潜むヤマト
背後には溶岩で覆われた原始惑星も見える。

吹き出すことも観測されています。これを双極ガス流といい、それには磁場が関係していると考えられています。

円盤中の塵は、互いの速度差が小さいため、衝突は穏やかで、粉々に飛び散るよりも、合体して次第に大きな天体となります。こうしてできた直径数kmの天体を微惑星と言います。ヤマトの周囲に無数に散らばっていたのは、この天体です。

微惑星同士も、ゆっくりと衝突するとくっついて次第に大きくなります。こうして、その近在でたまたま最も早く大きくなった微惑星は、その重力で周囲の微惑星を次々と引き寄せ、やがて火星程度の天体になります。これを原始惑星と言います。「宇宙戦艦ヤマト２１９９」では、微惑星のほか、原始星、双極ガス流、原始惑星なども、きちんと描かれています。

実在

ヘリオポーズ

Heliopause

太陽の恩恵が及ぶ果て。ここより先は強烈な宇宙線が飛び交うところ。覚悟を決めて船出せよ。

ＥＫＢＯを過ぎたら太陽系は終わりではありません。太陽から吹き出す荷電粒子の勢いは、まだ先まで続いています。それが恒星間空間の宇宙放射線に押し戻される限界。それが太陽圏（ヘリオポーズ）なのです。

太陽の表面からは電子や陽子、各種の原子核が磁場などで加速され太陽系空間を吹き払っています。これを太陽風と言います。これは放射線なので、人体に有害ですが、実は地球環境を守っている面もあるのです。

恒星間空間には、太陽より強い放射線を出す恒星や星間磁場が放射線のエネルギーを高くするため、生物にとって、恒星間宇宙放射線の方がずっと危険なのです。しかし、太陽圏の中ならば物質量で優る太陽風が星間放射線を吹き払っているので、その被害を直接受けずに済んでいるのです。

太陽圏は現在、太陽から100天文単位ほどのところにまで広がっていて、これはボイジャー探査機によっても確かめられました。しかし、これは現在、太陽の活動が活発なためです。活動が弱まると、地球軌道付近まで縮小してしまい、地球は強烈な恒星間宇宙放射線に直接さらされ、地表の生物は絶滅してしまうのではと危惧する人も出てきています。

ヘリオポーズ
ボイジャー探査機の結果を元に考えられた太陽圏の様子。

実在

太陽系のできかた

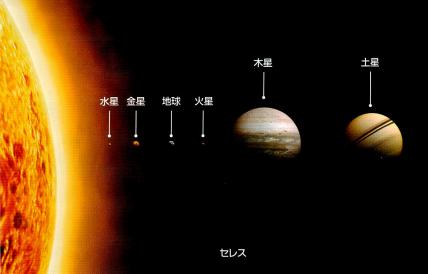
Formation of the Solar System

人類のふるさと太陽系。調和が取れた現在の姿は必然なのか。現在まで残された手がかりから謎に迫る。

太陽系は、今から46億年ほど昔、恒星間を漂うガスと塵が集まってできました。その筋書きは京都大学の林を中心とした１９７０年代の研究で見通しが付けられ、その後の観測により修正・補強されています。

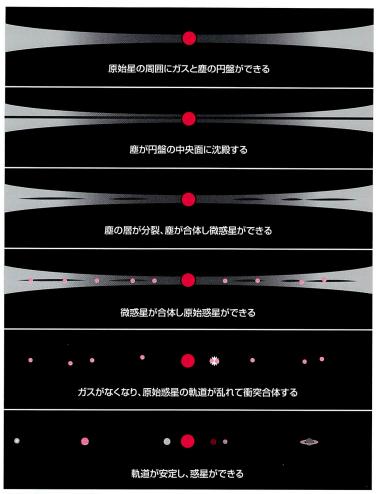
太陽系には８個の惑星がありますが、太陽に近い内側には岩石を主体とする水星・金星・地球・火星の４惑星が、その外側には質量のほとんどが水素とヘリウムからなる木星と土星が、その外側には内部にある氷や凍ったメタンやアンモニアが質量の多くを占める天王星と海王星があります。

それ以外にも多数の小天体があり、特に海王星軌道より外側の太陽系外縁部には多数のＥＫＢＯがあります。

太陽系のできかたを考えるためには、これらの特徴を再現する必要があります。逆に言うと、こ

れらの特徴を手がかりに、どうやって原始惑星系から現在の太陽系の姿にたどり着くのかを物理学の知識も駆使して、推定することで、より正しい太陽系の歴史を描き出すことができるのです。

原始惑星ができると、ほとんどの微惑星は重力によってその表面に捉えられ、惑星間空間からはほとんどなくなってしまいます。

しかし、外縁部では大きな原始惑星ができなかったため、多数の微惑星が今でも残っています。これがEKBOです。

太陽に近いところでは太陽からの輻射熱で物体の温度が高くなります。このため、内側では温度が高くても固体でいられる岩石質の塵が主体の原始惑星ができます。最終期にはこれらが互いに衝突合体して、水星から火星までの4惑星となったと考えられます。月は、この時期の巨大衝突で原始地球から引きちぎられた小天体が集まってでき

太陽系のできかた

太陽系を横から見た図。天体の大きさや相互の位置は、これとはだいぶ異なる。

たとされています。衝突で高温になった惑星は全体が溶けて、塵に含まれていた鉄やニッケルなどが中心部へ沈殿し、逆に密度が低い岩石が表面近くを覆った天体となります。

太陽系の場合、火星軌道と木星軌道の間で温度が0℃を下回ります。この温度だと星間塵に含まれていた氷は気化してガスになることなく固体のままなので、これが惑星を作る材料に加わります。このため、ここより外側にできる原始惑星は地球などよりずっと重い天体になります。

特に、木星や土星の位置では、物質が豊富にあること、公転周期が短いことと関連して早い段階で変化が進むことなどが影響し、周囲にある水素やヘリウムのガスも原始惑星に捕まります。その量が非常に多いため、それらの重さも加わり、さらにガスが集まってくると言うこととなって雪だるま式に巨大な惑星ができます。こうして、中心近くまで水素とヘリウムばかりでできた、巨大なガス惑星ができます。

土星軌道より外側になると、氷が加わって増えたとはいえ、原始惑星系を作っていたガス円盤が希薄になり、原始惑星の材料そのものが不足します。このため、天王星や海王星の位置ではガスが雪だるま式に集まるところまでは原始惑星が成長せず、質量の大半は、早い段階で集まってくる物質になります。こうして、氷が主体の惑星になります。

原始惑星が次第に大きくなる変化は、原始太陽系全体で同時に一様に進むわけではありません。重力で集まってくる過程なので、その変化速度は、基本的には、その付近での天体の公転速度と関連するからです。したがって、変化は、太陽に近いところでは急速に、太陽から遠いところではゆっくりと進むことになります。

太陽系の惑星

太陽系の惑星の大きさ比べ。
©NASA/JPL

EKBO

惑星だけでは太陽系形成の手がかりはつかめない。EKBO などの小天体も重要な情報をもたらす。©NASA

この辺りの段階で、残っていたガスが太陽系外に吹き飛ばされます。原因やしくみはわかっていませんが、何らかの形で太陽が関係していると思われています。こうして、原始惑星に取り込まれなかった水素やヘリウムが太陽系からなくなります。

ガスがなくなると、原始惑星の動きは、太陽以外には相互の重力だけになります。このため、一時的に軌道の乱れが生じ、いくつかの原始惑星は相互に衝突・合体して大きくなると考えられます。地球付近では、衝突前の原始惑星は火星程度の大きさになると予想されているので、火星やそれより小さい水星は合体が起こらず1個の原始惑星のまま進化が進んだのかもしれません。

こうして相互に軌道が調整され、今日観るような太陽系になったのです。これが、現在、多くの人が基準としている太陽系形成の歴史なのです。

第三章 星々の海へ

実在

VLBI望遠鏡

Very Long Baseline Interferometer

8光年離れた先から8年前の地球の様子を捉える望遠鏡。電波では既に実用化されている。

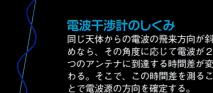
VLBIとは、超長基線干渉計のことです。複数の望遠鏡を組み合わせて巨大望遠鏡に匹敵する精細さで天体画像を得ることができる装置です。可視光ではまだですが、電波でならば20世紀のうちに実用化されています。

同じ天体からの電波を2つのアンテナで同時に捉える場合、電波源が両者を結ぶ線と直角方向にあるならば、どんな信号も両者に同時に到着します。もし、斜めの方向にあれば、一方には少し早めに信号が到着します。逆に、到着時間差を測定できれば、電波源の方向を測ることができます。そこで、天体からの信号を極めて正確な時計の信号とともに記録し、それを持ち寄って再生し、比較することで電波源の方向を極めて正確に測る望遠鏡をVLBIといいます。

同じ角度差ならば、アンテナ間の距離が長いほ

電波干渉計のしくみ

同じ天体からの電波の飛来方向が斜めなら、その角度に応じて電波が2つのアンテナに到達する時間差が変わる。そこで、この時間差を測ることで電波源の方向を確定する。

ど、時間差は大きくなります。逆に、時間差の測定精度が同じならば、アンテナ間の距離が長いほど、わずかな角度差まで測ることができます。このため、電波を用いた天文学ではアンテナを数千kmも離した観測網が組まれています。

現在、世界には日本の4カ所にアンテナを置くVERA、米国内10カ所にアンテナを置くVLBA、そして、必要に応じてアジア・ヨーロッパの15基程度の電波望遠鏡を同時に使用するEVNなどのVLBI望遠鏡があります。1国では収まらない距離だけ離れたアンテナを利用するとなると国際協力は必須です。天文学者は、この意味で、世界で最も国際的な職業と言えるかもしれません。

画像を多数の光源の集まりと考えると、

VERA電波望遠鏡
VERA石垣島観測局のVERA20m電波望遠鏡。

ＶＬＢＩ望遠鏡で極めて精細な映像を得ることも可能です。ただし、光源が多数あることを間違いなく判断するためには、いろいろな方向で異なった距離にアンテナを配置する必要があります。つまり、広がった範囲に多数のアンテナを配置しておく必要があるのです。

こうした事情から、日本が米国や欧州諸国などと共同して南米チリで運用している電波望遠鏡ＡＬＭＡでは、66台のアンテナを十数㎞の範囲に点在させ観測を行っています。ただし、ＡＬＭＡでは信号を記録せずに、全てのアンテナ間を相互に繋いだ信号線を用いて即座に到達時間差の測定を行っています。この場合、精密な時計は不要です。２つの信号を重ね合わせて干渉させることで、その強度から時間差を測ることが可能だからです。このような望遠鏡は電波干渉計と呼ばれます。

ＶＬＢＩでの時間差の測定限界は記録に用いる時計の正確さと共に、用いる信号の周波数が関係します。光なら電波より信号の周波数が桁違いに高いので、原理的にはアンテナ配置の広がりがより小さくても同じ程度に精細な画像が得られるＶＬＢＩを作ることができます。

光でＶＬＢＩ望遠鏡を作るのが困難なのは、全ての部品を桁違いに精密に作る必要があることの他に、光を直接増幅する必要があるからです。多数の集光用望遠鏡からの信号を比べるために信号を分割すると弱くなってしまうからです。

「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の場合、沖田艦長の指示で示された地球の画像と同程度の画質の画像を8光年先から得るには、光を捉える望遠鏡群をヤマトの周囲３０００㎞ほどの範囲に配置しておく必要があります。そう考えると、ＶＬＢＩ望遠鏡を構成する集光用望遠鏡を搭載した衛星が、ヤマトの周囲を巡っているはずです。

ALMA望遠鏡
66台のアンテナがあるALMA望遠鏡。
© 国立天文台

実在

天体測距

Distance Measurement in the Universe

天体までの距離。そこまで行かずにどのように測っているのか。5つの原理の組み合わせで実現する。

VERA20m電波望遠鏡

VERA小笠原観測局にあるVERA20m 電波望遠鏡。
撮影：中川亜紀治

「宇宙戦艦ヤマト2199」では、シリウスまでは8・6光年、大マゼラン銀河までは16万8千光年という数字が登場します。これらは現在の天文学で知られている値ですが、どうやって測ったのでしょうか？

目標に到達することなく、そこまでの距離を測定する原理とは、光や電波の反射応答、三角視差、明るさの測定、大きさの測定、内部運動モデルを利用した視線速度との関連づけの5つです。

とはいえ、原理的な方法だけでは全ての天体までの距離を決めることはできません。まずは、対象となる多数の天体までの距離を求め、それを用いて天体の性質を解明します。得られた性質から、その種の天体に共通する特徴を見つけると、それは天文学上の法則の発見になります。それを利用して、より遠くの天体に適用することで、その天

体までの距離を得るという手順を繰り返して、最終的には宇宙の果てにある天体までの距離を求めるのです。
この手順は「梯子を作って1段ずつ昇って天に届く」という印象なので、距離の梯子と呼ぶことがあります。
光や電波の反射応答の測定は、レーダーによる目標までの距離測定で用いているものです。地上から光や電波を目標に向けて発射すると、しばらくして反射信号が戻ってきます。光速は真空中では一定、大気中でもほぼ同じなので、目標までの往復距離に比例して戻ってくる時間が長くなります。そこでこの時間を測れば目標までの距離を測ることができるのです。
ただし、この方法はせいぜい太陽系内の天体にしか使えません。反射信号が検出できるほどの大出力発信源が作れないこと、また、何光年も離れた天体だと信号が戻ってくるのに時間が掛かりすぎるからです。けれども、この方法で太陽系内の天体までの距離を求めることが今は距離の梯子の第1段になっています。
三角視差は、離れた2地点から見える目標の方向が距離に応じて変わることを利用します。このとき、2地点から見える方向の角度差を視差と言います。
2地点と目標とがなす三角形は一方の地点から見た方向と視差だけで形が決まります。なので、2地点間の距離を別の方法で測っておけば三角形の大きさも決まり、観測地点から目標までの距離を測ることができるのです。
この原理による測距は、実際に戦艦大和でも使われています。主砲塔の両側にある四角い箱状の部分を通して見た目標の方向を測り、そこから距離を求めていたのです。

天体までの距離の測り方
これら５つの原理を組み合わせて距離をもとめる。

天文学では2地点の代わりに地球の公転運動を利用します。これによる視差を年周視差と呼びます。数年程度では天体までの距離はほとんど変わらないので、このようなことができます。三角視差を用いた距離測定は相手の天体の性質によらないことが大きな利点です。

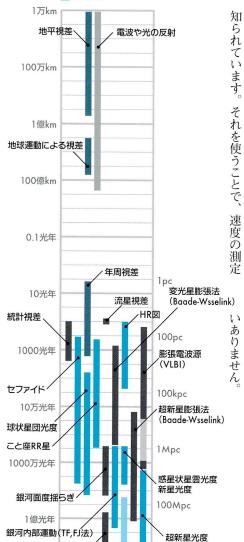
天体の真の明るさを距離によらない測定量から推定できれば、それと見かけの明るさを比較することで距離測定ができます。同じ明るさの光源でも距離が遠くなると暗く見えるからです。

例えば、多くの星は色と真の明るさに関係があることが、年周視差などで求めた距離を用いた結果、わかっています。色は距離によって大きくは変化しないと考えられるので、そこから真の明るさを推定します。あるいは、距離がわかっているある種の変光星を多数調べると変光周期と真の明るさに関係があることが知られているので、変光周期から真の明るさを推定できます。

遠くにある物体はそれに応じて小さく見えます。このため、天体の性質から真の大きさが推定できれば、それと見かけの大きさを比べることで距離を推定できます。

対象物体が光や電波を放っている場合、その信

距離の測り方と適用範囲

目的の天体に応じて測定方法を変えている。

号を分析することで、ドップラー効果を利用して、対象が近づいているか遠ざかっているかの速度を測定することができます。この測定値は対象物体の運動だけによるので、それと距離との間に関連する天文学の法則が見つかれば、それを逆に利用することで距離が決まります。例えば、宇宙は膨張しており、距離に比例して速度が変わることが知られています。それを使うことで、速度の測定から距離を推定するのです。

宇宙を航海するとき、自分がどこに居るのかを知らないと迷子になってしまいます。特に、ヤマトのように太陽系外を旅する場合、周囲の恒星までの距離を測り、逆に自分の位置を確かめることも重要な作業です。ワープをするたびに、ヤマトは大航海時代の船のように天測をしているにちがいありません。

実在

シリウス

Sirius

シリウスB

シリウス

シリウス
シリウスと伴星シリウスBのイメージ画像。
©NASA, ESA and G. Bacon (STScI)

地球から見ると夜空で一番明るい恒星。ヤマトが冥王星の次に立ち寄った恒星。

太陽系から8・6光年にある主系列星で、半径は太陽の1・7倍、質量は2倍ほどですが、真の明るさは26倍もあります。「宇宙戦艦ヤマト2199」では名前しか出ませんが、姿を見たい星です。伴星として白色矮星があるからです。

シリウスの伴星シリウスBは最初期に見つかった白色矮星です。既に核融合は終了しています。過去の余熱で光っているだけの星で、冷えていくばかりですが、そのペースは遅く冷え切るには何百億年と要するはずです。にもかかわらず、大きさを維持しているのは電子の縮退圧で支えられているからです。

VERAとJASMINE

年周視差による天体の距離測定は、天体の種類や性質に影響されないため、最も信頼性の高い方法と言えます。しかし、天の川銀河内の天体までの距離を得るのでさえ、極めて高い角度測定を達成する必要があり、特別な観測装置や望遠鏡を作る必要があります。

ＶＥＲＡはＶＬＢＩ技術を応用した年周視差観測専用の電波望遠鏡で、国立天文台が建設し、鹿児島大学と共同で運用しています。岩手県水沢、鹿児島県入来、小笠原諸島父島、沖縄県石垣島の4カ所に設置した直径20ｍのアンテナで構成されています。メーザーと呼ばれる強く輝く電波源を使って、星が形成されている領域や末期の恒星までの年周視差を観測しています。

ＪＡＳＭＩＮＥは国立天文台が計画している年周視差観測用天文衛星の計画で、最終的には3種類の衛星を順次打ち上げる予定です。最初の2つは打ち上げ準備中ですが、最後の衛星は大規模なので、他の衛星と協力して行うことを検討しているそうです。

いずれの計画も天の川銀河の全体構造や天体の運動を求めることが目標です。他に類似の計画を進めている国もあります。それらが協力して、宇宙について、新しく正確な情報が得られるようになるのです。

VERA望遠鏡入来局
撮影：中川亜紀治

実在

グリーゼ581

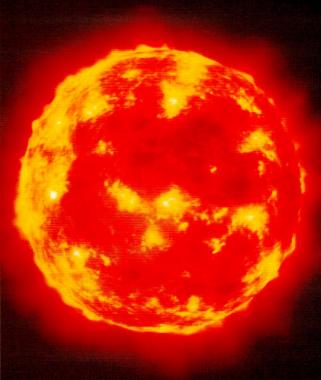
Gliese 581

地球から20光年余りにある赤色矮星。周囲には複数の惑星が回っているという。

この星は、太陽系からは、てんびん座の方向に見える10等星の星で、見つかっている中では太陽系から89番目に近い星です。6つの惑星が巡っていると言われ、その内の1個は生命居住可能域にあると期待されています。

グリーゼが作った太陽系から20パーセク（約65光年）以内にある恒星リストの581番目に掲載されていることから、この名で呼ばれます。多くの天体の例に漏れず、てんびん座HO星、ウォルフ562などいくつもの異なった名でも呼ばれます。直径、質量とも太陽の0・3倍ほどの暗くて目立たない星で、表面に大きな明るさのムラがあることが知られています。

太陽系から見ると、大マゼラン銀河は、かじき座の方向に当たり、銀経280・465度、銀緯マイナス32・888度に見えますが、グリーゼ581

は銀経354・080度、銀緯プラス40・017度と、かなり異なった方向に見えます。
先を急ぐヤマトが何故ここに寄ったのかは大きな謎です。ワープ航法の都合、敵の拠点を回避するなど戦略上の都合、さらにはイズモ計画派の陰謀などいろいろな理由が考えつきますが、判断の手がかりが不足しています。

グリーゼ581
グリーゼ581の実画像。
©Digital Sky Survey

グリーゼ581の惑星
グリーゼ581を巡る緑色の惑星が描かれている。

同じ明るさの天体ならば、近いほど明るく見えますが、恒星の真の明るさには1万倍以上の開きがあり、暗い星ほど数がうなぎ登りに増えるため、太陽系の近くにあるからといって、その恒星が地球から明るく見えるとは限りません。グリーゼ581がよい例で、太陽系に近い恒星の1つでありながら、10等星より暗く、望遠鏡なしでは存在すら知ることができません。1000光年以上先にあるのに1等星として見えるデネブとは好対照です（デネブが例外的に明るいと言うべきですが）。グリーゼ581が注目されるのは、恒星自体の特徴が理由ではなく、その周囲に惑星が見つかっているからです。

グリーゼ581を巡る惑星は、いずれも別項で紹介する視線速度法（70ページ参照）で存在が推定されているものです。その意味では間接的な状況証拠で見つかっているに過ぎないのですが、単にその姿を捉えるだけよりも重要な情報がいくつか得られています。その1つが恒星からの距離です。

何らかの方法で恒星の質量が推定できれば、高校の物理でも習う重力の法則と力学の法則を組み合わせるだけで、それを巡る惑星の公転周期と距離との間に関係式を作ることができます。視線速度法や食検出法では、惑星の公転周期を直接、求めることができるので、このデータから、惑星の恒星からの距離を得ることができます。この結果

グリーゼ581を回る惑星

グリーゼ 581 に到着したヤマト。
画面左奥に見える赤い星がグリーゼ 581。
右には緑色の惑星が見える。

を検討してみると、存在しているとされる6つの惑星の内、3つがなんとか生命居住可能域にあるということがわかったのです。ただし、この内の2つは存在自体が他の現象の誤認ではないかとの疑いが出てきているため、1個しか該当しない可能性も高くなってきています。

しかしながら、「宇宙戦艦ヤマト2199」をよく見ると、ヤマトがグリーゼ581星系にワープアウトしたシーンで、ヤマトの右舷前方に緑の惑星が見えているのです。これに気付いたのか新見情報長は着陸調査申請を出しますが、沖田艦長に却下されます。しかし、それで完全に諦める必要はなかったのです。望遠鏡で分光観測をすれば、この惑星の大気組成や気温をヤマトからでも調べることはできたのです。宇宙旅行にはやっぱり観測天文学者が役立つのですよ。このことはお忘れなく！

実在

赤色矮星

Red Dwarf

質量が太陽よりずっと小さな恒星。暗くて低温とはいえ、近づけば人並みの恒星とわかる。

恒星は中心で水素の核融合が続く主系列星の時代が最も長く続きます。この段階は恒星の全質量によって様子が少しずつ変わり、最も軽いものは小型で低温です。これを赤色矮星といいます。

恒星は内部で起こっている核融合で生じたエネルギーによって自ら光っている天体です。太陽も恒星の1つで、その表面温度は６０００度ほどですが、もっと低温の星もあり、３０００度を少し下回る程度のものまであります。このくらい低温の星は赤く鈍く輝いています。

このような低温の恒星を多数集めてみると、大きさが百倍以上も異なるものに2分できることが20世紀の初めにヘルツシュプルングによって発見されました。大きな方を赤色巨星、小さな方を赤色矮星と言います。このうち、「宇宙戦艦ヤマト２１９９」に登場するのは赤色矮星です。

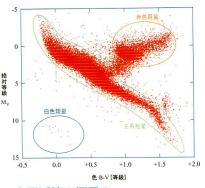
赤色矮星は小型とは言え、地球の十倍以上の直径があると考えられています。このため、宇宙船で近づいたとすれば、巨大さと凄まじいエネルギーで圧倒されるはずです。その様子は「宇宙戦艦ヤマト２１９９」で描かれたものに似ていると予想できます。

赤色矮星

赤色矮星とその周りを回る３つの惑星のイメージ図。

グリーゼ581の表面付近を行くヤマト
小型とはいえ主系列星。表面の様子は相当なものだ。

恒星は軽いものほどたくさんできる上に、主系列星でいる時間が桁違いに長いため、宇宙では暗くて目立たない赤色矮星の方が多数派です。実際、太陽系の近くでは半数以上がグリーゼ581のような赤色矮星なのです。

恒星は、集まった物質が互いの重力で収縮しようとするのと、中心部で起こっている核融合で生じた熱による圧力とが釣り合って大きさと形状を維持している天体です。このため、軽い星では中心での核融合反応がずっと穏やかで、限界より軽いと核融合反応が起きず、恒星とはいえません。水素の核融合の有無でいうと、この境となる質量は太陽の8%とされ、これより重ければ赤色矮星と呼びますが、軽ければ褐色矮星と呼び、たいていの場合、恒星には含めません。なお、余り知られていませんが、この値を最初に示したのは京都大学の中野武宣です。

太陽近傍の恒星のヘルツシュプルング・ラッセル図(HR図)

HR 図で見ると星が分類できる。斜めに並ぶのが主系列星で、その右下端の星を赤色矮星と呼ぶ。

全体が光り輝いているために、恒星はその全体でエネルギーを生じている印象を受けがちですが、実は、核融合は恒星の中心やその周りでしか起こっていません。主系列星の場合に限れば、核融合を起こしているのは中心核のみで、太陽の場合だと、体積で1%以下しかありません。残り99%の部分は、そこから生じたエネルギーで加熱され光っているに過ぎないのです。

とはいえ、地球上で冬の日差しから連想される穏やかに光る表面というイメージは全くの間違いです。コンロの熱源がガスの火に限られたとしても、そこにかけた鍋の湯が煮えたぎっていることがあるように、熱源がそこになくても加熱が強烈ならば表面でも激しい現象が起こる可能性は大いにあります。むしろ、より外側からの押さえがないだけ、表面の方が激しい現象を起こしやすいとも言えます。グリーゼ581でヤマトが目撃したのも、たぎる主系列星の表面でした。電離ガスとは言え、星全体の平均密度は1 cm³当たり18 gもあります。恒星に突入したらひとたまりもないでしょう。

ところで、同じ恒星とはいえ、赤色巨星は主系列星が直径で百倍以上に膨張したもので、主系列星とは様子がかなり異なります。平均密度が百万分の1以下となるため、特に外層部では地球大気と比べても桁違いに薄くなります。宇宙船で赤色巨星の内部に突入しても、窓から目で見ただけではそれと気付かないかもしれません。

実在

プロミネンス

Solar Prominence

逃げるヤマトを追うシュルツ司令が乗るシュバリエル。その行く手に立ちふさがるは巨大な紅炎！

プロミネンスとは「飛び出した」という意味の英語で、恒星の場合、紅炎と訳します。恒星表面から宇宙空間にガスが大規模に突出する現象です。太陽で起こるものは地球から望遠鏡で観測できます。

プロミネンスは、彩層と呼ばれる太陽の表面にある電離ガスが上空に突出して見えるものです。電離した水素ガスが放つ紅色の輝線で光って見えるため、紅炎と呼ばれます。実際には爆発で吹き出したわけではなく、太陽表面からΩ字状に飛び出した磁力線に1万度の電離ガスが捕まっているものと考えられています。ただし、どのようにできるのかは、まだよくわかっていません。

「宇宙戦艦ヤマト２１９９」では、プロミネンスが登場するシーンでフレアという言葉も出てきます。両者は、フレアという現象によって生じた物をプロミネンスと呼ぶという関係です。作中でも

確かにそう使い分けていました。
太陽観測衛星「ひので」搭載の望遠鏡でプロミネンスの動きを見ると変化はゆっくりに見えます。これは太陽の巨大さが実感できないための錯覚です。プロミネンスの高さは地球の直径の何倍もあるのです。

プロミネンス

太陽観測衛星「ひので」が撮影した太陽のプロミネンス。

©国立天文台/JAXA

実在

光年とパーセク

Light Year and Parsec

光年は距離の単位だが、時間の単位と勘違いしている人も多い。天文学者があまり使わないことはあまり知られていない。

光が1年掛かって進む距離を1光年といいます。秒速30万㎞で進むので単純に計算して、その距離は9兆4600億㎞。しかし、天文学者は代わりにパーセク(pc)を使っています。1パーセクは3・26光年です。

1パーセクを掛け算して求めると、30・8京㎞となります。天文学の研究では、なぜこんな半端な単位を使うのでしょうか。そもそも、1パーセクとは何に基づいて決めた距離なのでしょうか。

それは近くの恒星までの距離を年周視差（88ページ参照）で測っていることと関係があります。年周視差が1秒角、すなわち、3600分の1度

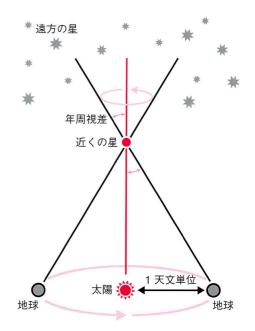
になる距離を1パーセクと決めたのです。

年周視差は、地球の軌道半径に当たる1天文単位だけ隔たった2点から目標が見える方向の違いなので、パーセクを単位とすれば、観測結果だけで目標までの距離を表せるのです。このため、ほとんどのデータ集や公式がパーセクを単位として記述されています。しかも、この距離はたまたま、太陽近くの恒星の典型的な間隔とも一致します。

こうした事情から、研究レベルでは距離の単位にはパーセクが使われているのです。

とはいえ、天の川銀河の直径や遥か遠方の銀河までの距離を表すにはパーセクを使っても数値が大きくなりすぎます。そこで、mに対してkm、ヘルツに対してメガヘルツがあるように、パーセクに対してもキロパーセクやメガパーセクという単位が使われています。このキロやメガは、それぞれ千倍、100万倍という意味です。このルール

は、ほとんど全ての単位で通用するので覚えていると便利です。

パーセクはアルファベット記号ではpcと書き、

年周視差
地球の公転運動による見かけの動きの大きさを年周視差という。これが1秒角になる距離が1パーセク。

目標までの距離は?
アニメではよく耳にする「光秒」だが、実は、天文学では使っていない。

キロパーセクやメガパーセクは左側にｋやＭを付すことで表します。このとき、大文字と小文字は区別して使うことに注意して下さい。キロやメガをｋやＭで表すルールも、ほとんど全ての単位で通用します。

　パーセクや光年より近い距離を表す単位はどうなっているのでしょうか？「宇宙戦艦ヤマト２１９９」では敵艦までの距離などとして「光秒」という単位が登場しています。言葉の意味から考えると、１光秒とは光が一秒間に進む距離、すなわち、30万㎞に相当すると見当が付きます。しかし、この単位はアニメなどでは多用されるものの、天文学では目にしたことはほとんどありません。

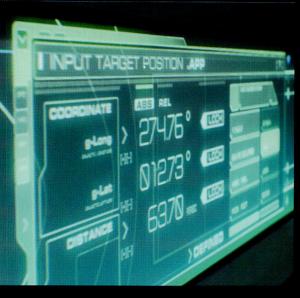
　代わって天文学で用いられるのは、先ほども登場した天文単位です。地球と太陽の平均距離を距離の単位としたもので、１天文単位は１億５０００万㎞に当たります。天文単位はアストロノミカル・ユニットを略してauと書き、エーユーと棒読みすることもよくあります。

　年周視差の定義から、１天文単位と１パーセクとの比は頂角が３６００分の１度の直角三角形の二辺の長さの比になります。ですから、１パーセクは20・6万天文単位であることが直ちに計算できます。

　不思議なことに、天文単位にはキロやメガを付けることはほとんどありません。これは、地球や太陽から該当する距離に具体的な天体がほとんど見つかっていないことが理由かもしれません。実質的に観測が可能な太陽系外縁部は、太陽から50天文単位ほどまでであるのに対し、最も近い恒星ケンタウルス座アルファ星（アルファ・ケンタウリ）までの距離は１・３５パーセクもあるため、キロ天文単位で表したくなる距離には具体的な観測対象が何もないのです。

銀経と銀緯

Galactic Longitude & Latitude

三次元の宇宙で、方向を示すには二つの角度が必要。このうち、天の川を基準とするのが銀経と銀緯。

冷静に考えれば当たり前ですが、宇宙には万人に共通する基準となる「水平線」がありません。このため、方向を示すには二つの数値が必要で、しかも水平線に対応する基準面を取り決めておく必要があります。

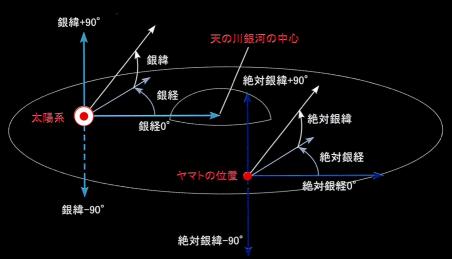
基準面の決め方には何通りかの流儀がありますが、関係者全員が納得でき、かつ実際の測定も比較的簡単である必要があります。

回転運動の軸を用いるのが一つの方法です。我々は地球にいるので、地球の自転軸を基準とするのが自然でしょう。こうして決めたのが赤道座標です。赤道に基づく経度緯度なので、赤経・赤

銀経・銀緯と絶対銀経・絶対銀緯

銀経は太陽系から見た銀河中心方向を原点としているが、そこから遠く離れたヤマトの位置では銀河中心の方向がずれるので作中では絶対銀経としている。

緯といい、その値を表す文字として、α・δを用います。

一方、天の川銀河での位置を気にするならば、天の川を基準面にするのが便利です。こうして決めたのが銀河座標です。天の川銀河に基づく経度緯度なので、銀経・銀緯といい、その値を表す文字にはl・bを用います。

ワープ直前に島が設定したのは、絶対銀経・絶対銀緯でした。銀経は太陽系から見た天の川銀河中心の方向を0度とするのですが、ヤマトは地球から遠く離れているので、銀河中心の方向は変わっています。そこで、太陽系の銀経・銀緯方向と平行に座標軸を決めたものとし、作品用に作ったのがこの言葉なのです。

架空

次元断層

Dimensional Faults

淡い光に包まれた謎の空間。「ここでは時空の性質が反転している！」沖田艦長はそう言うが。

異常なワープの後、ヤマトが出現したのは地球の海中の様にも見える謎の空間でした。波動エンジンの動作もおかしく、沖田艦長と真田副長は時空結節点、つまり、次元断層だと断定します。果たして、その正体は？

「時空の性質が反転している」とはいうものの、艦内の様子を見ると乗組員の体調や直接操作している機器には異常は無いようです。著しく影響を受けているのは波動エンジン。つまり、波動エネルギーと関連したところだけ時空の性質が変わっているのです。

波動エンジンは真空から無限にエネルギーを取り入れることができる旨の台詞があります。これが大きなヒントです。

真空を「何もない」と捉えると、そのエネルギーは理解不能になります。しかし、場の量子論では

真空を「合体すると無くなる2種の粒子の組の生成消滅が釣り合った状態」と考えるのです。

水面で例えてみましょう。静かな水面に立った波を物質と見なすと、場の量子論で言う真空とは、さざ波が立った水面に対応します。広い範囲・長い時間で平均すると水面は完全に平らなので、この状態は物質が何もないことに相当します。しかし、狭い範囲・短い時間で見ると水面は上下しているので物質が存在することになります。

このさざ波は時空自体の性質によるので、ある程度以上に静まることはありません。真空とはエネルギーが最低の状態なのです。このため、さざ波自体のエネルギーを取り出すことは不可能です。では、真空のエネルギーとは何なのでしょうか？

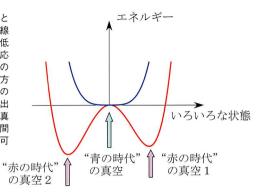
再び、水面で例えてみます。山の上の湖ならば、海へ水を落とすことでエネルギーが得られます。高さの違いが位置エネルギーの違いになり、その

真空の相転移

時空の性質が変化して状態とエネルギーの関係が青い曲線から赤い曲線に変わると、最低エネルギーである真空に対応する状態が変わる。青の時代の真空より赤の時代の真空の方がエネルギーが低いので、この差がエネルギーとして取り出せる。ただし、左右どちらの真空になるかが異なれば、その間でもエネルギー差が生じる可能性がある。

次元断層に迷いこんだヤマト

次元断層の内部。

脱出には波動砲で。

差がエネルギーとして取り出せるのです。しかし、湖が海面と同じ高さだと水は流れずエネルギーは得られません。同じように、真空からエネルギーを取り出すには、「位置エネルギー」がより低い状態と結びつける必要があるのです。

宇宙膨張などにより時空の性質自体が変わると、真空に相当する状態が変わることがありえます。これを真空の相転移と言います。これが起こると、対応するエネルギーの差を取り出せます。水面で例えると湖の底が下がることで水面全体が下がることに相当し、それによる水の動きからエネルギーが得られるわけです。宇宙誕生の直後に真空の相転移が起こり、生じたエネルギーで宇宙が急膨張したとするのがインフレーション説なのです。

ここまでの知識を利用すると、波動エンジンとは、相転移前後の真空を結びつけ、そのエネルギー差を取り出す機関だと推定できます。結びつけられる過去の真空が1つの宇宙全体ならば、その量は莫大なので、事実上、無限にエネルギーを得られると言っても良いでしょう。これが、私が考える波動エンジンの動作原理です。

では、現在よりエネルギーが低い真空と結びつけてしまったらどうでしょう。エネルギーの流れは逆になり、流出してしまいます。次元断層内での波動エンジンの振る舞いは、この予想と一致します。ならば、次元断層とは内部が我々の真空よりエネルギーが低い真空の宇宙だと考えられます。

ビッグバンの直後に起きた相転移の際に、我々の宇宙の真空より真空のエネルギーが低くなった小さな宇宙ができていました。これが次元断層の内部なのではないでしょうか。

実在

ハビタブルゾーン

Habitable Zone

惑星系を描くモニターに浮かぶ生命居住可能領域の文字。地球に似た惑星がある可能性を示す。

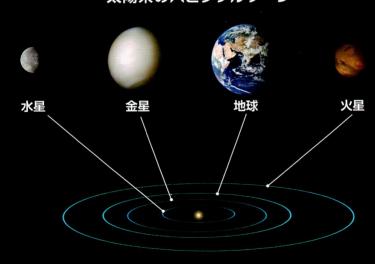
地球の自然環境を支える最大のエネルギー源は太陽です。他の惑星系でもこれは同じ。そして、1つの惑星系内では恒星に近いほど熱く、遠いほど寒くなります。その中間の惑星で、生物が暮らすのに丁度よいのが生命居住可能領域です。

恒星の周囲を惑星が巡っていても、その表面が熱すぎたり寒すぎたりしたら生物がいる可能性は低いでしょう。では、丁度よい温度範囲とは何度

から何度なのでしょうか？

（地球上で）見つかっている生物を調べてみると水が液体であることが重要な要素を占めていることが分かります。全てが蒸発するほど熱いと干からびてしまうし、全てが凍ってしまうと凍結して活動を中止してしまいます。水が液体でいる温度は気圧にもよりますが、一気圧下なら摂氏０度から１００度の間です。

そこで、恒星からの距離を基に、そこに存在する惑星の表面が、この温度範囲に収まる範囲を生命居住可能領域、英語でハビタブルゾーンと呼びます。

この範囲は、恒星が明るいほど遠くになり、暗いほど近くになります。惑星の雲の量や温室効果の程度によっても少し変わってきますが、太陽系の場合だと、金星・地球・火星が生命居住可能領域に含まれます。

太陽系の生命居住可能領域
生命居住可能領域を示す緑色の箇所を見ると、金星・地球・火星が生命居住可能領域に入っているのがわかる。©NASA/JPL-Caltech/T. Pyle

実在

太陽系外惑星

Exoplanet

40年前は空想するだけだった太陽系外の惑星。今や1800個以上も発見されている。

1995年にペガスス座51番星で最初の1個が見つかって以来、太陽系外の惑星は現実のものとなりました。現在では、惑星や惑星系の違いの原因の究明や、個々の惑星の詳しい性質の探求が研究テーマとなっています。

太陽系内に比べて恒星間は桁違いに遠く、恒星に比べると周囲を巡る惑星は何億分の1も暗いため、その観測には特別な工夫が必要です。

現在の太陽系外の惑星を探す方法は主に4つ（100ページ参照）。直接、惑星が放つ光をなんとかして捉える直接撮像法、惑星が恒星を揺り動かす様子を恒星の視線速度で捉える視線速度法、

恒星の手前を惑星が通過する際の微かな金環日食を捉える食検出法、そして、惑星の重力が遥か遠方の星が放つ光を曲げて地球上に焦点を結ぶ現象から惑星存在を推測する重力レンズ法です。

同じ惑星に対して複数の検出法での発見が重なると確実性が増すばかりでなく、単独の方法ではわからなかった惑星の特徴も調べることができ、

軌道上の想像図

太陽系外惑星を発見することを目的としたNASAの人工衛星。食検出法により大量の惑星を発見した。

フォーマルハウトを回る惑星
2004年と2006年のハッブル宇宙望遠鏡撮影から発見された。矢印の向きに移動する光点が惑星とされる。

その質量、直径、公転周期、恒星からの距離などにわかには信じられないほど豊富な情報を得ることができます。

メイヨールとケロッツがペガスス座51番星を巡る惑星を見つける以前から、数多くの天文学者がいろいろな方法で太陽系外の惑星検出に挑戦してきましたが、誰も成功していませんでした。

太陽系の惑星のように、惑星が反射する光を見つけるのが最も単純ですが、恒星の光に比べて惑星の反射光は非常に弱く、普通に観測しただけでは検出は不可能です。

そこで、望遠鏡の視野のど真ん中だけを隠す特殊なカメラを開発して撮影するという考えが登場します。この装置を恒星コロナグラフと言います。こう書くと単純に画像の真ん中を隠すだけでよいと思いがちですが、それだけではうまくいきません。望遠鏡の画像はどうして写るのかについて研

究する物理の一分野である光学をきちんと踏まえて設計する必要があります。それでも、直接撮像法で検出できた太陽系外惑星は未だ数えるほどしかなく、いずれも恒星から大きく離れた惑星ばかりです。

メイヨールとケロッツが用いたのは視線速度法でした。

恒星の光を分光すると多数のスペクトル線が現れます。その波長は多くの星で共通していますが、恒星が動くとドップラー効果によって全部が一様に移動します。恒星の周りを惑星が巡っていると、惑星の重力で恒星もわずかながら動くので、これがスペクトル線の一斉移動として現れるはずです。

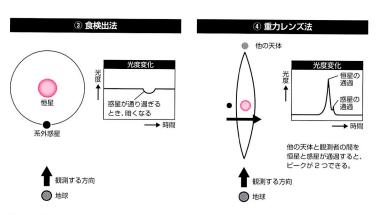
そこで、観測結果が惑星の公転に伴って生じる変化パターンと一致するかで惑星を間接的に検出するのです。2000年頃までは、この方法で多数の惑星が見つかりました。

食検出法は、ずっと単純です。恒星の手前を惑星が通過すると、惑星は照らされていない側しか見えないので、その面積だけ恒星を隠し、暗くするはずです。恒星の明るさを長い間観測し続け、このパターンが現れるかを探すのです。明るさを測るだけで良いので、多数の恒星を同時に監視し続けるようになると、この方法で見つかる惑星が飛躍的に増えます。専用の人工衛星ケプラーが上がると威力は絶大でした。

重力レンズ法は、MACHOの項(112ページ)で説明するのと同じ方法をもちいます。他の方法よりかなり軽い惑星まで原理的には検出可能ですが、惑星について確実にわかる情報がかなり乏しいので、補助的な方法と考えるべきだと私は思っています。

こうしてたくさんの例が集まると、予想外の事実がわかってきます。地球がある太陽系とはかな

① 直接撮像法

系外惑星
恒星
主星の光にうもれるので
惑星が見えない。
観測する方向
地球
主星の光を隠して撮影。
惑星が見えた。

② 視線速度法

系外惑星
前後のふらつき
恒星
観測する方向
地球

太陽系外惑星の検出方法

位置天文法、視線速度法、食検出法、直接撮像法の４種類。

り異なった様子の惑星系がかなりあったのです。

1つは灼熱ガス惑星の存在でした。ペガスス座51番星などでは、太陽系での水星軌道より恒星の近くに木星より巨大なガス惑星が巡っていたのです。こうした惑星を灼熱ガス惑星といいます。もう1つは大離心率惑星です。太陽系の惑星とは異なり、1周の間に恒星との距離が何倍も変わる惑星が見つかったのです。

これらは惑星のでき方についての研究に改良を迫り、今や、それを反映した新しい修正案が提唱され続けています。

第四章
銀河の外へ

実在

天の川銀河

Milky Way Galaxy

太陽系が属する銀河。一〇〇〇億を超す恒星が渦巻状に集まったこの天体は、地球からは天の川として見える。

月が出ていない時に、街明かりがないところで夜空を見上げると天の川が見えます。帯状に見えるこの天体は実は、直径10万光年、厚さ1000光年ほどの巨大な円盤状に集まった恒星や星雲の大集団なのです。

ヤマトが向かうイスカンダルは地球から16万8000光年の彼方にあります。テレビシリーズでは全体の半分に当たる第14話でヤマトは天の川銀河を離れます。古代と森が百式で行った航路哨戒飛行の場面で、背景に描かれていました。

この天体が地球から帯状に見えるのは、太陽系が天の川銀河の円盤の中にあるからです。恒星は

百式と天の川
古代と森が乗った百式のバックに天の川銀河。

どれも人間が距離感を得られる限界を遥かに越えた遠方にあるため、奥行き感が失われています。その結果、円盤の厚みに対応する帯状に恒星が集まっているように見えるのです。

天の川銀河の広がりに比べれば、シリウスやグリーゼ581などは、ほんの近所に過ぎません。「宇宙戦艦ヤマト2199」ではあまり登場しませんでしたが、そこには種々の天体があり、多数の興味深い現象が起きているのです。

天の川銀河は構造上、円盤部、バルジ、ハローと呼ばれる3つの部分からなっています。

円盤部はディスクとも呼ばれ、その名の通り、恒星が円盤状に集中している部分です。太陽系も円盤部に含まれます。ここには恒星ばかりでなく、星間ガスも集中しており、そこに混在する塵が可視光を遮るため、可視光での見通しはよくありません。太陽系からだと、一声、1万光年以内しか可視光では観測できません。

星間ガスが豊富なので、当然、星雲も円盤部に集中しています。また、豊富な星間ガスから現在も多くの恒星が形成されています。円盤部の天体のほとんどは円盤に沿った円運動をしています。

円盤部には恒星や星雲が渦巻状に集中したところがあります。ここを渦状腕と呼びます。円盤部にある天体の距離を測って三次元分布を得たり、似た特徴を持つ他の銀河との比較から集中している箇所などがわかりました。

太陽系の近くでは三本の渦状腕（の一部）が通っています。内側から、いて腕、オリオン腕、ペルセウス腕と名づけられていて、太陽系はオリオン腕に含まれます。他に、たて腕、みなみじゅうじ腕、りゅうこつ腕などがあります。ただし、天の川銀

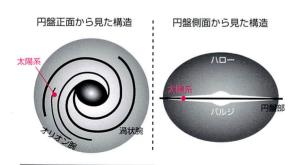
河全体で、これらの渦状腕がどのように繋がっているのかは、未確定なところがあり、現在解明が続けられています。

バルジは中心付近にあり、円盤部に比べて厚さが顕著に膨らんだ部分です。ここには星雲があまりなく、恒星の集まり方や運動の性質も円盤部とは異なっています。

ハローは、これら全体を取り巻く領域です。数10万個以上の恒星が球状に集まった球状星団が散在しているほかは、目立って見える天体はありません。しかし、円盤部の天体の運動から、暗黒物質が大量に存在していると推定されています。

これらとは別に天の川銀河の中心には、いて座A*（エー・スター）という名のブラックホールがあります。太陽の400万倍の質量がありますが、天の川銀河全体の質量は太陽の1000億倍もあるので、それに比べると重力的には非常にわずか

天の川銀河
全天を実際に撮影した画像をつなげたもの。
ⓒESO/S. Brunier

な影響しかありません。
「宇宙戦艦ヤマト２１９９」ではあまり描かれていませんが、天の川銀河の各部も非常に魅力的な天体に満ちあふれているのです。

天の川銀河の構造
左は円盤の真正面から見た天の川銀河、右は円盤の真横から見た天の川銀河。中心にバルジがあり、取り巻くように円盤部がある。円盤部を取り囲むようにハローがある。

実在

銀河

Galaxy

天の川銀河だけが銀河じゃない。
宇宙には、似た天体が何千億と
存在し、多彩な姿を示している。

アンドロメダ銀河
渦巻銀河の典型例。
© NASA/Swift; background: Bill Schoening, Vanessa Harvey/REU program/NOAO/AURA/NSF

「宇宙戦艦ヤマト２１９９」では、３つの銀河が登場します。これらはいずれも１００億から１０００億個の恒星と多数の星雲、そして星間ガスが集団をなした天体です。望遠鏡で探してみると、多数の銀河を見つけることができます。

天の川銀河と大マゼラン銀河を見比べると形がかなり異なることに気づくかもしれません。天の川銀河は渦巻状で全体がほぼ円形であるのに対し、大マゼラン銀河はそれほど整った形をしていません。

望遠鏡で探してみると、このいずれとも異なる形をした銀河がいろいろ見つかります。それらを多数集め、実際には立体的な天体であることを考慮すると、大きく二種類に分けられることがわかります。

一つは天の川銀河に似た渦巻銀河、もう一つは

おとめ座の楕円銀河M87

楕円銀河の典型例。

©J. A. Biretta et al., Hubble Heritage Team (STScI /AURA), NASA

恒星が楕円形に集まっているだけで目立った模様が見られない楕円銀河です。楕円銀河と比べれば、大小マゼラン銀河は渦巻銀河に近い特徴を持つことが分かります。一言で渦巻銀河と言っても、さらに細かく分類できるのです。

多数の銀河をその見かけの形だけから分類したものを銀河の形態分類といいます。これにはいくつかの流儀がありますが、特に有名なのはハッブルによって提唱されたものです。

ハッブルの形態分類でも、まず、楕円銀河と渦巻銀河に二分します。全体が円盤状で星がなす濃淡模様が渦巻状に見えるものを渦巻銀河、全体が楕円形で星は中心に集中するだけで特徴的な模様が見られないものを楕円銀河とします。

ハッブルは楕円銀河を見かけの偏平度（どのくらい円形からつぶれて見えるかの割合）で分類しています。しかし、これは楕円銀河が必ずしも球

形ではないことしか意味しておらず、どちらから見ているかの手がかりがないため、実際の立体形状を反映した分類にはなっていません。

ハッブルの分類では、渦巻銀河をバルジの形で二分します。円盤の正面から見た場合を推定したとき、ほぼ円形に見えるはずのものを（狭義の）渦巻銀河、棒状に見えるはずのものを棒渦巻銀河と呼びます。

ただし、実際の銀河では両者の中間的なものも多く、この区別は明確ではありません。

このそれぞれについて渦状腕の巻き込み具合で3〜7段階に細分します。不思議なことに、巻き込みがきつい銀河ほど円盤部の広がりに対するバルジの大きさが大きいという特徴があります。

楕円銀河と渦巻銀河の特徴の中間の位置を占める銀河もあり、レンズ状銀河と呼ばれます。偏平なバルジの周囲に小さな円盤部がありますが、そこには顕著な渦巻き模様は見えません。

ハッブルは、これらのいずれにも分類できない銀河を不規則銀河と名付けました。大小マゼラン銀河も、この分類だと不規則銀河になります。ただし、この分類は「その他」に近いものがあり、実際、不規則銀河とは本質的に異なる種類の銀河が含まれていることが今ではわかっています。

例えば、大小マゼラン銀河は、小型の渦巻銀河に似た特徴を示すため、「マゼラン型渦巻銀河」と分類することもよくあります。

天の川銀河の近くには大小マゼラン銀河以外にも小型の楕円銀河や不規則銀河がいくつかあることが知られています。いて座矮小楕円銀河やおおいぬ座矮小銀河などがそれです。「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の続編がシリーズ化して、これらを舞台とする話も登場しないかと天文学者として密かに期待しています。

ハッブルの銀河の形態分類

エドウィン・ハッブルが提唱した銀河の分類法。見かけの形状から似たもの順で並べて、上記のように分類した。

おおいぬ座矮小楕円銀河とその尻尾

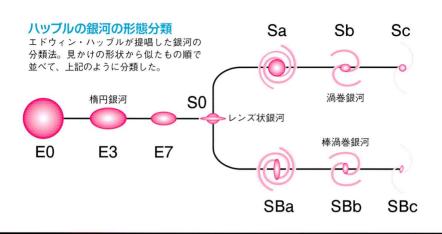
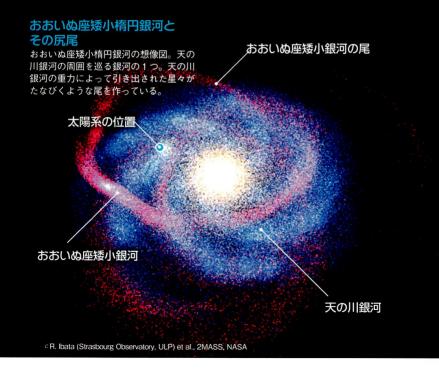
おおいぬ座矮小楕円銀河の想像図。天の川銀河の周囲を巡る銀河の1つ。天の川銀河の重力によって引き出された星々がたなびくような尾を作っている。

おおいぬ座矮小銀河の尾

太陽系の位置

おおいぬ座矮小銀河

天の川銀河

MACHO

Massive compact halo object

天の川銀河の外縁部に潜む謎の天体。質量を持つが光らない、この天体は重力レンズで見つけ出された。

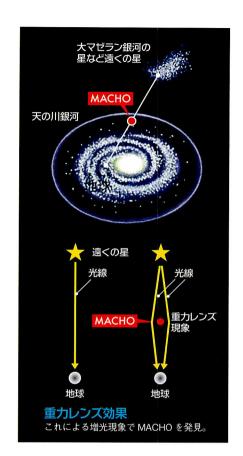
銀河の回転運動を調べると銀河の外縁部にもかなりの物質が存在しているはずだと推測されます。しかし、そこには該当する天体が見当たりません。これを担うほとんど見えない天体の候補がＭＡＣＨＯです。

天体が回転運動をしているならば、それに対応する重力が働いており、その重力を生じる物体があるはずです。その質量は、物理学の法則を利用することで、回転運動の様子から求めることができます。この方法を用いて、銀河各部の質量を求めてみると、銀河の外縁部にも大量の物質が存在

することがわかります。しかし、観測しても対応する天体は見つかりません。

そこで、銀河外縁部には光っていない小さな天体が多数存在するとの予想がたてられました。これがＭＡＣＨＯです。ハロー（銀河外縁部を意味する）にある重くてコンパクトな天体を意味する

大マゼラン銀河
この銀河の星を多数監視し、重力レンズによる増光を見つけることで MACHO が見つかった。

重力レンズ効果
これによる増光現象でMACHOを発見。

英語の略ですが、筋骨隆々たる男性という単語でもあります。
ＭＡＣＨＯを見つける方法として光が重力によって曲げられる効果が利用され、実際に発見されました。しかし、その数は期待の半分程度しかなく、質量不足は今でも謎のままです。

物体には、力がなにも加わらなければ同じ速さで同じ方向に進み続けるという性質があります。これを慣性と言います。逆に言うと、速さが変わったり、進行方向が変化したりするのは何らかの力が加わっている証拠になり、速度変化の様子から力の向きと大きさが推定できます。さらに、この力が重力によるとすれば、それを生じる物体の質量が推定できるわけです。天体の質量は、ほとんどがこの原理に基づいて求められており、例えば、太陽の質量も高校で習う物理の公式を用いるだけで、地球の公転運動から求めることができます。
この方法を銀河に適用すると銀河の内側から外側に向かって質量がどのように分布しているのか

を調べることができます。その結果わかったのは、光っている星や電波を放っている星間ガスの質量だけでは、銀河外縁部の質量が足りないということでした。この不足する質量を「見失っている質量」と呼びます。

その正体の1つとして提唱されたのがMACHOです。しかし、この説が正しいかを判断するには、他の証拠が必要です。

特殊相対性理論を拡張した重力理論である一般相対性理論が提唱されると、光も重力の影響で曲がることがわかりました。これは、太陽の近くを通る光線が実際に太陽に引っ張られる方向に曲がっていることが観測され、事実とわかります。

重力源に引っ張られるように曲がるということは、重力源が凸レンズに似た効果を及ぼすことを意味します。これを重力レンズ効果と言います。普通の天体が及ぼす重力だと、光が曲がる角が小さいため、重力レンズの焦点距離はとてつもなく長くなりますが、宇宙規模なら、遠方の天体の光が地球上で焦点を結ぶことも起こりえます。その時には、光源は本来よりも明るく見えるはずです。光源、重力源、地球の三者は互いに運動していることを考えると、重力レンズによる増光は明るさの変化として捉えられます。

そこで、大マゼラン銀河中の多数の恒星を同時に監視し、明るさを測る計画が実施されました。数年の観測の結果、重力レンズ効果によって生じる増光パターンが実際に見つかったのです。MACHOは実在していたのです。

その正体は明確にはわかっていませんが、非常に暗い恒星、自由浮遊惑星、超軽量のブラックホールなどが考えられます。まさに、バラン星（134ページ参照）のような天体が天の川銀河と大マゼラン銀河の間にあったのです。

実在

中性子星

Neutron Star

中性子ばかりでできた超高密度天体。高速で回転するそれはパルサーとも呼ばれる。

ヤマトが強敵ドメルの大艦隊と最初に戦ったのがカレル１６３の宙域でした。淡く輝く超新星残骸の中心部で回転している星、これが中性子星です。光をビーム状に出すため、遠くからは点滅する星として観測されます。

中性子星は超新星爆発の際の爆縮によって押しつぶされた恒星の中心部で、質量のほとんどが中性子ばかりで占められた星です。強烈に押しつぶされた結果、密度が極めて高く、１㎤当たり10億ｔもの重さになっています。

押しつぶされた結果、中性子星は自転速度も極めて速くなっています。回転している物体は一様に縮むと回転速度が速くなる性質があるからです。百分の1秒から数十秒で1回自転しているものが多いのですが、1秒間に1000回以上自転している中性子星も見つかっています。

爆縮の際には物質と共に磁場も押しつぶされます。恒星を構成する電離ガスは磁力線を逃さないため、物質と共に磁場も圧縮されるのです。この結果、多くの中性子星は強い磁場も持ちます。

強い磁場があると、それに高速で運動する電子が影響され強い電磁波が放射されます。この放射は強い方向性を持つため、特定の方向だけを照ら

かに星雲

チャンドラＸ線望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡が撮影したかに星雲。可視光の画像（赤）にＸ線の画像（紫）を重ねている。

すビームとなります。
知っている人も多いと思いますが、実は、地球の磁石の極は自転軸で決まっている北極・南極とはずれています。北磁極はカナダに、南磁極は南極大陸の端にあります。中性子星の磁極も同様で、自転軸に対して傾いているものがたくさんあります。

このため、光のビームは自転と共に照らす方向を変え、回転式サーチライトやレーダーのように宇宙のいろいろな方向を順番に照らし出すことになります。カレル163にワープアウトしたヤマト乗組員が目撃したのは、このような天体だったのです。

ビームが照らし出す方向から見ると、ビームに照らし出された時にだけ中性子星が強く輝いて見えます。このため、中性子星は自転時間に応じた短い時間で明滅する天体として見えるわけです。

ここから中性子星をパルサーと呼ぶこともあります。「脈動的に光って見える星」を略して作った呼び名です。

ところで、爆縮で押しつぶされると、なぜ中性子ばかりの物質になるのでしょうか?

地上で見かける物質のほとんどが原子でできていて、そこには電子が含まれています。電子には2個以上が同時に同じ状態にはなれないという性質があるため、同じ温度では密度の限界が生じます。このため、圧縮に対して反抗する力が発生するのです。

これを電子の縮退圧といいます。物質が電子を含んでいるために生じる硬さと考えると理解しやすいかもしれません。

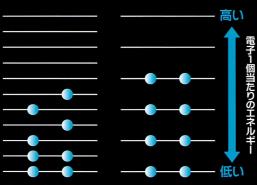
周囲からの圧縮力が電子の縮退圧を超えると、電子は存在し得なくなり、原子核中の陽子と合体します。この反応は単独で存在する中性子が崩

壊する反応の逆反応で、逆ベータ崩壊といいます。これが起こると、原子核が中性子過剰となり、さらに反応が進むと星全体が中性子だらけになるのです。

天体は同じ質量ならば半径が小さいほど重力が強くなるため、一度、限界を超えて押しつぶされると自分の重力で潰れたままとなります。こうして中性子だらけの星、中性子星ができるのです。

電磁波のビーム

自転軸

パルサー
中性子星は特定の方向だけに強い光を出すので、特定の方向から見ると自転によって明滅するように見える。

電子の完全縮退圧
密度が高いと電子が取り得るエネルギーの間隔が開くため、全エネルギーが同じなら、電子はびっしり詰まった状態となる。

実在

超新星残骸

Supernova Remnant

重い恒星はその最期に大爆発を起こす。星間空間に残った、その痕跡が超新星残骸という星雲。

太陽よりずっと重い恒星は、末期に中心部で爆発的な収縮が起こります。爆縮と呼ばれる、この現象が起こると反動で恒星の外層部が吹き飛び、その衝撃が星間ガスに伝わって、星雲となります。

多数の銀河を観測していると、ある日、突然、それまで見えなかった星が数日間だけ見えることがあります。超新星と呼ばれる、この現象は、その名に反して恒星が最期に起こす大爆発です。

超新星が爆発するエネルギーはすさまじく、太陽が百億年かかって放つ全エネルギーに匹敵するほどです。爆発で生じた爆風は周囲の星間空間に超音速で広がるため、周囲の星間ガスは逃げ切れずに爆風の前面に溜まります。この際にガスだけでなく、磁場や高エネルギー電子も掃き集められ、それらが電波や光を放つのです。したがって、典型的な超新星残骸は、電波で観測すると球殻状に

かに星雲

おうし座にある超新星残骸。

見えます。超新星残骸の内部は希薄な超高温ガスで満たされていて、これがX線を放ちます。ただし、綺麗な球殻状に見えないものもかなりの数が見つかっていて、同時にできた中性子星からエネルギーが供給されるためではないかと推測されています。

「宇宙戦艦ヤマト2199」に登場する超新星残骸は、ドメル将軍が部下に中性子星カレル163として紹介している映像です。これは架空の天体ですが、実在する超新星残骸には、かに星雲やカシオペア座A、はくちょう座網状星雲などがあり、特に、かに星雲はカレル163星雲とよく似た外観をしています。

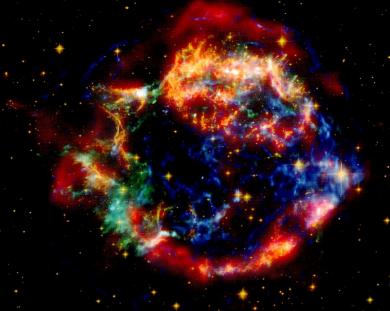
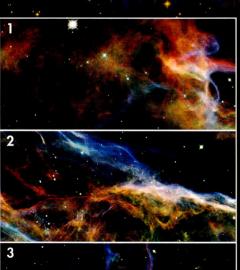
かに星雲やカレル163には内部に回転する中性子星がありますが、超新星残骸の多くは内部に中性子星がありません。中性子星ができない超新星爆発でできたのではと考える説もありますが、

爆発が非対称に起こった結果、できあがった中性子星はある方向に飛び出してしまい、今では超新星残骸からずっと離れた場所に移動してしまったのではないかとする説もあります。

超新星残骸は、輝線星雲（150ページ参照）と並んで、周囲の星間ガスを押しのけ、かき混ぜる作用を及ぼします。これによって、恒星内部で作られた炭素や酸素、ケイ素や鉄、金、銀、銅、そしてウランなどの元素を星間空間に広くまき散らす働きをしていると考えられています。特に、ビスマスより重い元素は超新星爆発の際にしか作られないので、地球上でウランまでの元素が見つかると言うこと自体、生命や人類が誕生し、文明が発生するためには超新星爆発や超新星残骸が欠かせない存在だと言うこともできます。

また、超新星残骸とその周囲では磁場が激しく動かされるため、電子や陽子が加速されて、高エネルギー粒子となる原因となっていると考えられています。

超新星残骸で作られた高エネルギー粒子は、場合によっては途中で素粒子反応を起こしたり、別のところの磁場でさらに加速されるなどして、強烈な宇宙放射線となります。ですから、生命が生息する天体の近くで超新星爆発が起こると、そこからの強烈な宇宙放射線で、その生物が絶滅することもあるかもしれません。

なお、超新星爆発を起こす重い星は、できる割合が小さいので、銀河の中でも特に大量に星ができる領域でないとなかなか見つかりません。カレル163のように銀河間空間と呼べる領域で超新星残骸が見つかることは珍しく、ヤマトに天文学者が乗り組んでいたなら、その興味を大いにそそったはずです。

カシオペア座A

超新星残骸の例。赤外線を赤、可視光を黄、X線を緑と青の光に置き換えて作った画像。

ⓒX-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: NASA/STScI; Infrared: NASA/JPL-Caltech/Steward/O.Krause et al.

網状星雲

ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した超新星残骸のはくちょう座網状星雲（3点）。

ⓒNASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration

架空

ビーメラ4

Bemera4

オムシス不調のため、立ち寄ることにした惑星。そこは植物が繁り、昆虫が住む地球に似た惑星。

「宇宙戦艦ヤマト2199」では、天の川銀河と大マゼラン銀河の間にある恒星ビーメラの第4惑星とされています。昆虫が進化した知的文明があったのですが、300年ほど前に滅んでいました。

文明の担い手は人間に似ているとは限りません。ビーメラ4の宇宙人は昆虫が進化した生物でした。とはいえ、彼らが作っていた文明は人類やガミラスの文明とはかなり異なっていた可能性があります。

多くの人が思っているのとは異なり、人類は、DNA構造は全く同じ同種の生物ですし、身体的特徴も生物種としての違いはありません。その社会は智恵や信頼を基盤とする社会的関係に基づいた分業によって作られているのです。このため、必要となれば、一世代のうちでも社会構造を柔軟に修正することができます。

一方、昆虫は成長の過程で身体的特徴が異なる種類に分かれることで分業を達成し社会を構成しています。例えば、女王蜂は幼虫の頃から他の蜂とは異なる餌を与えられてできるので、一度、働き蜂になった個体は女王蜂にはなれません。このため、社会構造を変えるには2世代以上を要することになります。

それを知るためにも、ビーメラ4に考古学的調査団が派遣されることを期待しましょう。

ビーメラ4の宇宙人

ビーメラ４の宇宙人は昆虫が
進化した生物のようだ。

実在

中性子

Neutron

陽子と共に原子核を構成する素粒子。単独では放射線を発し、人に当たると死に至らしめる。

中性子は、原子核実験により1932年にチャドウィックが発見しました。陽子とほぼ同じ質量ですが、電荷を持ちません。原子核内で陽子と共存していると壊れませんが、外にでると壊れて放射線を出します。

原子核外に単独でいる中性子は陽子と電子と反電子ニュートリノに壊れ、約12分ごとに数が半減します。この変化をベータ崩壊と呼び、その際に飛び出す高エネルギーの電子をベータ線と呼びます。ベータ線は放射線の一種で人体に当たると被爆します。ただし、β線は厚さ数㎜のアルミ板などで遮ることができます。

中性子自体が物体に照射されると原子核内に入り込み、そこに取り込まれることがあります。取り込まれた原子核内で陽子と中性子の数にアンバランスが生じると放射線を出しながら別の原子

核に壊れる反応が起こります。こうして、通常の安定した物質が放射能を帯びるのです。このため、人体が中性子線を大量に浴びると重大な放射線障害となり、死んでしまいます。

亜空間ゲートを起動させるためにシステム衛星に行った真田副長は、装置を起動させると制御室内に大量の中性子が生じることを発見します。

中性子を大量に浴びれば人は確実に死ぬので、それを避けるためには中性子の発生源を、中性子を通さない物質で遮蔽するか、そのような物質で作った障壁の影に隠れる必要があります。ところが、中性子の場合、他の放射線より遮蔽が難しいのです。

放射線にはいろいろな種類があります。アルファ線やベータ線は厚さ数㎜程度のアルミ板などで遮蔽でき、ガンマ線は鉛板で遮蔽できますが、中性子線は高速だとなかなか吸収されないた

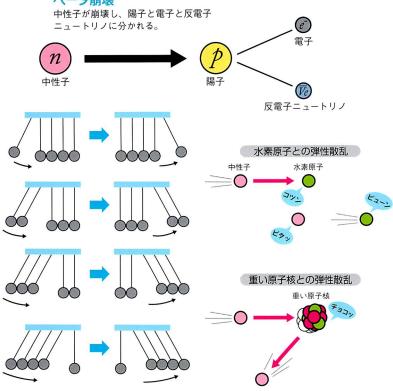
め、これらの素材の板も透過してしまいます。では、中性子を止めるにはどうすればよいのでしょうか？

同じ大きさの鉄球が五個ぶら下げて並べてある科学玩具を見たことはありますか？　衝突球という名で売られているようですが、左端の球を移動してから手を離すと、ぶつかった球はそこで止まり、反対側の球1個が動き出します。このとき、中間の球は力を伝えているだけで、それ以外の機能は果たしていませんが、左端と右端の球が同じ重さであることが重要です。この場合、左端の球の動きは全て右の球に移り、左端の球は止まってしまうのです。同じ現象は2個のビリヤード玉でも実験できます。

中性子は陽子と質量がほぼ同じなので、中性子を止まっている陽子に衝突させると中性子をそこで止めることができます。水素原子は、その原子核が陽子そのものなので、これは水素を大量に含む物質ならば中性子を止めることができることを意味します。

身近にあって扱いやすい物質では水やパラフィンが水素原子をたくさん含む物質なので、これらは中性子を止めやすいのです。真田副長が助かったのも、この効果と考えられます。（あれで水の量が充分かは不確実ですが。）

ただし、これだけでは不充分です。止まった中性子が他の原子核に吸収され、それが放射能を持ってしまえば、特に、それが体内に取り込まれると内部被曝を起こしてしまいます。そこで、地上では水で止めた中性子を、そこに溶かし込んだホウ素に吸収させるという方法を採っています。地球上にあるホウ素原子核の20％は中性子一個を吸収しても安定したままで放射能を持たないからです。

中性子が崩壊し、陽子と電子と反電子ニュートリノに分かれる。

衝突球

左端の玉を離すと、反対側の玉が飛び出す。

中性子を衝突で止める

上の衝突では、中性子はピタッと止まるが、下の衝突では跳ね返されてしまう。

コントロール衛星を作ったアケーリアスの宇宙人も我々に似た生物でしょうから、中性子線を浴びれば死んでしまうでしょう。真田副長らが遭った「事故」を想定してホウ素水溶液のプールを用意していた可能性は大です。

もちろん、真田副長が宇宙服を着用していた点も見逃せません。気密服ですから、内部被曝は起きませんし、服自体にも中性子線以外の放射線なら遮蔽効果があるはずですから。

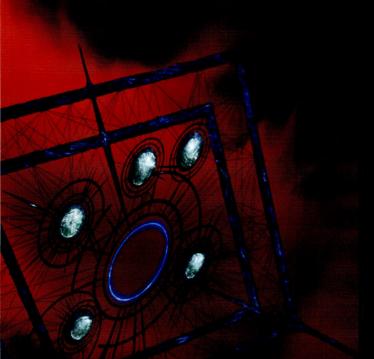
架空

亜空間ゲート

Hyperspace Gate

特定の2点間を直結する宇宙のトンネル。ガミラスが自在に用いているが建設したのは古代文明。

「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の世界では現在の文明に先行した星間文明が存在し、それが作り上げたのが亜空間ゲートによる超空間交通網です。これにおかげで何万光年も離れた所への大量輸送が可能となっているのです。

ワープの動作原理は不明確ですが、方向と距離をセットしても、実際の到着地点には誤差があるようです。そうならば、何万光年も一度にワープ

するのは出現場所に誤差がありすぎて危険です。
また、必要なエネルギーの都合で艦載動力源では長距離ワープには限界があるのかもしれません。
ワープに相当する時空回廊を常設し、動力源を固定点に置くならば、これらの心配は解消します。これが、亜空間ゲートが設置された理由と考えられます。
実際、テレビシリーズ第25話では、バランの亜空間ゲートを動作させるためにゲール艦隊は多数の艦船の動力をシステム衛星につぎ込んでいるシーンが登場します。
また、亜空間ゲートのワープ機能は、そこを通過する宇宙船によらず動作する仕様です。偵察に行った篠原が使用したツヴァルケにはワープ機能はないからです。
番組では明確に語られていませんが、亜空間ゲートの機能こそがガミラス軍の最大の強さだっ

亜空間ゲート
バランの衛星軌道上にある亜空間ゲート施設。

たと考えられます。これにより、戦闘部隊を短時間で長距離移動できることはもちろん、戦闘継続に必要な大量の物資輸送も効率よく行えるからです。

この点は、第二次世界大戦でのドイツ軍による電撃戦を連想させます。しかし、戦争では高速で大量の輸送を確保することが重要という認識はもっと古くから示されており、古代ローマ帝国の街道にその原形が見られます。地上設備を重点整備したという点では、普仏戦争や日露戦争での鉄道軍事輸送の方が亜空間ゲートに近いかもしれません。

鉄道輸送の場合、動力源を車載している蒸気機関車や気動車よりも、エネルギー源を地上に置く電車の方が高速大量輸送に適しているのは新幹線を筆頭とする高速鉄道の現状を見れば明らかです。超伝導リニアに至っては車両に駆動用のエネ

ルギーを供給する必要すら無いのです。

しかしながら、システムが地上設備に全面的に依存しているということは、そこを破壊されると全てがストップしてしまうことを意味します。実際、ガミラス軍はそこをヤマトにやられてしまったために敗戦の憂き目に見舞われるわけです。

ところで、亜空間ゲートの動作原理はワープと同じなのでしょうか？　利用する際に生じる光景を見ると、ゲシュタムジャンプ（ガミラスでのワープ技術）と亜空間ゲート通過時とでは宇宙船周囲に生じる現象が異なります。もっとも、ヤマトのワープも異なるので、これだけで違う原理だということはできません。けれども、亜空間ゲート的なシステムの方が、現代物理学との矛盾はかなり回避することができます。

ワープは利用の度に二地点間を繋ぐため、出現するところには必ず超光速で情報が伝わる必要があります。これが相対性理論の前提と矛盾するのです。しかし、最初から二地点間が繋いであれば、ゲート開設時点からゲートを通じて情報は伝わっているので、この矛盾を回避できるかもしれません。何万年も前にワームホールを作って、その一方を、通常空間を通って亜光速で運び亜空間ゲートにした。これが真相かもしれません。

ガミラス艦のゲシュタムアウト
艦載機関では、このように出現する。

架空

バラン星

Balun

天の川銀河と大マゼラン銀河の間に位置する宇宙の灯台。だが、そこはガミラスの一大基地。

自由浮遊惑星（138ページ参照）であるバランに建設されているガミラスの基地はバラン鎮守府と呼ばれる要衝です。空中に建設されたこの基地は、ずっと上空からケーブルで吊り下げられていることが画面から読み取れます（136ページ参照）。

ガス惑星は硬い地面がないため、そこに着陸するのは原理的に不可能です。代わりに「硬い地面」を人工的に作り、それを中空に浮かべれば着陸の目的は果たせます。ただし、浮遊大陸で述べたように、密度などを考えるとそれも簡単ではありません。

地球を巡る衛星の場合、その公転時間は地球中心からの距離で決まり、遠いほど長い時間となります。地表すれすれなら85分、月までの距離なら27日ほど。地上3万6000㎞ならば23時間56分、すなわち、地球の自転周期と一致します。衛星の公転は宇宙から見た運動ですから、この衛星は地上に対して止まっています。これを対地静止衛星といいます。

バランの質量や自転周期はわかりませんが、自転速度が遅すぎなければ、大気圏外に静止衛星を飛ばすことは可能です。そこから、全体の重心を動かさないようにして、バラン表面に向けてケーブルを降ろせば、その先の物体はバランに対して

宙に浮いていることになります。バラン鎮守府はこんな基地なのではないでしょうか。
鎮守府が上空の静止衛星から吊り下げられているかどうかは、ケーブルを辿れば確実ですが、ヒントは画面に描かれています。バランの赤道上空には亜空間ゲートから伸びる環状の構造があります。静止衛星は赤道上空にしか飛ばせないので、これが静止衛星ならば話はピタリと合います。本当かどうかぜひ確かめたいところです。
ところで、単に補給基地を作るのであれば、バラン星の大気圏内とする必要はありません。ガミラスの元帥ゼーリックが行った観艦式のように衛星軌道上に留めておけば良いのです。では、バラン鎮守府が大気圏内にある理由は何なのでしょうか?
可能性の一つはバランの上層大気がガミラスの大気と似ていることです。ドメル将軍が着任した際に出迎えたゲール中将は宇宙服を着ていません

バラン鎮守府

バラン鎮守府は静止衛星から
ぶら下がっているのだろうか？

バラン鎮守府はバリアで覆われている。

でした。ただし、天文学的にいえば、この可能性は低く、実際、ドメルの乗艦が着陸する際にはバリアが描かれています。

もう一つの可能性は、バランの大気自体です。ガス惑星は水素とヘリウムでできており、核融合燃料となるので、これを「採掘している」のです。画面をよく見るとケーブルは鎮守府よりさらに下まで伸びています。あの先に何があるのか、とても気になります。

バランは天の川銀河と大マゼラン銀河の中間に位置する天体で、特定の恒星の周囲を巡っているわけではない、自由浮遊惑星です。地球から見れば大マゼラン銀河を背景とした天の川銀河のハローに浮かぶ、暗すぎて見えないコンパクトな天体となり、まさに実際に発見されたMACHOそのものとなります。なお、MACHOの発見は1993年なので、バラン星の設定の方がずっと前になります。

バランという名は作中では、イスカンダルから提供された航海図に掲載されていただけで語源は不明とされています。アニメ作品の設定としての由来は公式には明らかにされていません。「宇宙戦艦ヤマト2199」ではBalunと綴られています。怪獣映画の題名からではないかとの説もありますが、2つの銀河の中間地点という位置を考えると、バランスから派生したのではとも考えられます。

調べてみると、この単語Balunは電子工学では平衡―不平衡変換器を意味し、特性インピーダンスが異なる二種類の信号線を接続する際に用いる部品とされています。電気に強い人なら、テレビのアンテナ線で75オーム同軸と300オーム平行フィーダー線の接続に使用する部品といえばおわかりでしょうか。

自由浮遊惑星

Free Floating Planet

**惑星は恒星の周囲を巡るもの。しかし時には、
宇宙を自由にさまよう放浪の惑星も実在する。**

バラン星
ガミラスの重要基地がある。

「宇宙戦艦ヤマト2199」に登場するバラン（134ページ参照）。それは太陽を持たない自由浮遊惑星でした。基地の様子から、硬い地面を持たないガス惑星とわかります。実は、こうした惑星は実在するのです。

恒星の周囲を巡る惑星は、恒星ができるのとほぼ同時に、恒星の周囲にあった回転するガスと塵の円盤からできたとするのが今の定説です。こうしてできた惑星の一つが何らかの原因で惑星系外に放り出されることがあれば、宇宙をさまよう惑星となります。

一方、恒星ができるのと同じ過程で、太陽の質量の80分の1程度以下の天体ができると、中心の圧力が不充分なため、中心での核融合が始まりません。これを惑星の一種と見なすと、やはり恒星を巡らない惑星になります。どちらの場合も、自

自由浮遊惑星
木星サイズの自由浮遊惑星のイメージ図。
©NASA/JPL-Caltech

由浮遊惑星を見つけることはかなり困難です。しかし、方法がないわけではありません。

一つは重力レンズ効果を利用するものです。MACHOの発見で述べた方法を用いれば、自由浮遊惑星自体が放つ光を捉えることができなくとも、その存在を観測で見つけることができます。

もう一つはできたてのものを探す方法です。核融合が起こらなくともできたての星は未だ収縮を続けているため、そのエネルギーで熱が発生します。これによって内部が温められ、星全体が遠赤外線で光っているのです。埼玉大学の大朝らは、この方法で初めて自由浮遊惑星OTS44を見つけました。少し重すぎるので惑星より重い褐色矮星ではないかとの批判もありますが、彼女らの発見で自由浮遊惑星を発見する研究が大きく進んだことは間違いありません。

第五章

大マゼラン銀河

実在

大マゼラン銀河

Large Magellanic Cloud

ヤマトの目的地。地球から16万8000光年の彼方にある。天の川銀河のすぐ隣にある銀河だ。

大マゼランの名を知る人は多いのですが、架空の天体だと思っている人も多いようです。太陽系から見える方向が北極星とほぼ正反対のため、地球自体が邪魔で日本からは見ることができません。しかし、南半球に行けば、天の川の切れ端のような姿がすぐわかる天体です。

この銀河の名は、世界一周航海に挑戦した一六世紀の航海家マゼランにちなみます。大マゼラン銀河は南半球では比較的容易に見えるのですが、ヨーロッパも日本も北半球にあるために夜空で見ることはできません。このため、西欧では、この銀河の存在は南半球まで出かける機会があった少数の船乗りしか知りませんでした。それがマゼランの航海記録を通じて広く知られるようになったため、この名で呼ばれるようになったようです。

この銀河を、英語名の直訳から大マゼラン雲な

いし大マゼラン星雲と表記する文献も多いのですが、星雲は銀河とは全く異なる種類の天体なので、混乱を避けるためにも、これらの呼び方はなるべく早期に止めるべきだと思っています。「宇宙戦艦ヤマト2199」では、この意見を入れてもらった結果、作中では大マゼラン銀河との表記でほぼ統一されました。

なお、後述のように小マゼラン銀河（146ページ参照）という別の銀河もあるので、「大」まで含めて天体名です。

大マゼラン銀河は天の川銀河に非常に近い銀河の一つです。以前は太陽系に最も近い銀河だと考えられていましたが、1994年に天の川銀河の中心の向こう側に、もっと近い「いて座矮小楕円銀河」が発見され、2003年には、さらに近い「おおいぬ座矮小銀河」が発見されたため、1位ではなくなりました。しかし、極めて近い銀河である

ことは間違いありません。

大マゼラン銀河は星の分布で見ると棒状の集中が見られる他は、特に整ったパターンが見られないため、かなりの文献では不規則銀河と分類されています。しかし、電波で星間ガスの分布を見てみると、きれいな円盤状をしており、渦巻銀河の一種であるとする学術論文がかなりあります。

銀河の規模としては天の川銀河の10分の1程度と小型です。天の川銀河との位置関係から、周囲を公転している衛星銀河だとする説が主流でしたが、2006年に発表された論文で目の前を過ぎっていく速度が初めて示され、それが予想外に大きかったことを根拠に、たまたま近くを通っているだけとする説が登場しました。しかし、その後の詳細な観測や解析の結果、数回は天の川銀河の回りを周回していると考える方が自然だとする訂正的な論文が発表されています。

大マゼラン銀河の際だった特徴の一つは、炭素より重い元素の割合が天の川銀河よりずっと少ないことです。天文学ではこのような元素を「金属」と表現します。水素やヘリウムはビッグバンの直後から存在している元素ですが、「金属」は恒星内部で核反応が起きた後でないと生じない元素であるため、「金属」が乏しいと言うことは、ビッグバンの直後により近い天体であることを示します。これは、大マゼラン銀河が、銀河としての歴史が浅いのか、あるいは、長い間、恒星がほとんどできなかったことを意味します。

「金属」が乏しいことは、別の問題も投げかけます。というのは、地球などの惑星は金属が多くないとなかなか形成されないからです。もしかして、ガミラスが地球にまで侵略の手を伸ばしてきたのは、大マゼラン銀河には他にほとんど惑星がないからなのでしょうか？

大マゼラン銀河

地球から見た姿。近年の学術論文では太陽系から16万光年の距離とするものが多い。左上でピンクに光っているのがタランチュラ星雲。©Axel Mellinger, Central Michigan Univ.

大マゼラン銀河と小マゼラン銀河

どちらも、差し渡しで満月の数倍以上の大きさに見える。©ESO/S. Brunier

実在

小マゼラン銀河

Small Magellanic Cloud

大マゼラン銀河とペアを組む銀河。大マゼラン銀河よりは少し遠くにあるが、天文学の歴史では重要な銀河。

南半球に行って暗い夜空を眺めると、大マゼラン銀河に寄り添うように、面積４分の１程度の銀河が見えます。これが小マゼラン銀河です。太陽系からの距離は20万光年と見積もられています。

小マゼラン銀河は恒星分布の形態が不規則である点や「金属」が乏しい点など、いろいろな特徴が大マゼラン銀河と似た銀河です。見かけと同じく、大マゼラン銀河より一回り規模が小さな銀河です。

２つのマゼラン銀河自体とそれらを取り巻く、希薄なガスの分布や運動から、小マゼラン銀河は大マゼラン銀河の周囲を回りながら、共に天の川

銀河の周囲を回っていると推定されています。
大マゼラン銀河と比較すると特徴の違いが乏しいためか、小マゼラン銀河が画期的な天文学研究の対象となった例は少ないのですが、極めて大きな影響を与えた発見が1つあります。
明るさが周期的に変わる星を変光星といい、元の明るさに戻るまでに要する時間を変光周期と言います。1908年、リービットは小マゼラン銀河にあるセファイド型とされる変光星を調べるうちに、その変光周期と真の明るさに関係があることを発見したのです。これは天体までの距離を決める方法として画期的な発見でした。

実在

銀河間空間

Intergalactic Space

星もまばらで星間物質も希薄。しかし、わずかに存在するガスや星は周囲の銀河の影響を受ける。

銀河の内部に比べれば、銀河間には星も少なく、ガスも桁違いに薄いことがわかっています。しかし、近くの銀河から重力や風圧の影響で引き出された天体が尾のように伸びている例が観測されています。

２つの天体が接近すると受ける重力は相手からの距離に応じて異なる強さとなります。この違いの結果、相手に向かって前後に引き延ばされるような力が働く効果が生じます。これを潮汐効果と言います。

天の川銀河と大小マゼラン銀河との間でも潮汐効果が働いていて、特に小マゼラン銀河の中から

マゼラニック・ストリーム
ピンクで示したように、天の川銀河を取り巻くようなガスの帯があり、その先端に大小マゼラン銀河がある。
©NASA

星やガスが引っ張り出され、帯状に並んでいる様子が観測されています。これをマゼラニック・ストリーム（マゼラン流）といいます。実態は全く違っていましたが、この名前は40年前のテレビシリーズでも登場し、学術論文で実在することを知ったときには大変驚いたものでした。

もっと遠くの宇宙を見ると、多数の銀河が集団をなしている銀河団があります。そこでは、銀河間空間でも非常に希薄で超高温のガスがあり、ここを多数の銀河が秒速１０００㎞で移動しています。これだけの速度だと銀河内の星間ガスが希薄なガスの風圧で吹き飛ばされ、尾のようにたなびいているのが見つかっています。

銀河間空間といえども完全な真空ではないのです。

実在

タランチュラ星雲

Tarantula Nebula

大マゼラン銀河にある巨大な輝線星雲。実在する星雲だが、七色星団という名の天体は架空のもの。

輝線星雲とは、高温の恒星が放つ大量の強い紫外線によって周囲の星間ガスが電離してできる星雲です。タランチュラ星雲は直径２０００光年以上もあり、大マゼラン銀河はもちろん、天の川銀河でも、これより大きな輝線星雲はありません。

太陽の数倍より重い恒星は、中心部で起こる激しい核融合反応で生じる熱で全体が高温となり、表面温度が数万度を超えます。これほど高温の物体は強い紫外線を大量に放つため、これが当たっ

た周囲の星間ガスは電離し、淡く輝く星雲を作ります。こうしてできるのが輝線星雲です。太陽系の近くではオリオン星雲や三裂星雲、ばら星雲などが有名ですが、この天体は天の川銀河だけにあるわけではありません。大マゼラン銀河にあるタランチュラ星雲もその種の星雲なのです。

タランチュラ星雲を電離しているのはR136と呼ばれる星団で、質量が太陽の100倍以上、表面温度が5万度以上の複数の恒星からなります。これらの星は、星雲に隣接した巨大な暗黒星雲から、400万年という天文学的には極めて短い期間で一気に形成されました。

これらの恒星は、縮退はしていないので七色星団とは異なりますが、恒星は温度の違いで少しずつ異なった色で輝き、輝線星雲は含まれる元素によって赤や緑の輝線で輝くので、多彩な色の天体と言えるかもしれません。

タランチュラ星雲
大マゼラン銀河にあるタランチュラ星雲。タランチュラとは毒グモという意味。
ⓒTRAPPIST/E. Jehin/ESO

オリオン星雲
太陽系から1500光年と近いところにある。
ⓒNASA,ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

イオン乱流

イオン乱流から抜け出したヤマト。

輝線星雲は周囲のガスが電離してできるので、内部は電離ガスで満たされています。電離ガスは、原子から飛び出した電子が、残ったイオンが散在する間を自由に飛び交っている状態のガスで、プラズマとも呼ばれます。星間ガスの主成分である水素の場合、電子が逃げた後のイオンは陽子そのものなので、宇宙での電離ガスは陽子と電子が混在状態になったガスといってもほぼ間違いありません。

電離ガスは電離する前のガスよりもずっと高温で圧力も高いため、輝線星雲はできた直後から、

輝線星雲の構造

高温の星から発せられる紫外線で周囲のガスが電離したのが輝線星雲。

周囲の電離していないガスを押しのけつつ、急速に膨張を始めます。輝線星雲の近くでは、この膨張で生じた衝撃波の兆候がよく観測されます。急速な膨張が起こっている上に、その進行は周囲のガスの密度によって大きく影響されるため、輝線星雲の内部では電離ガスが高速の乱流を作っている可能性もあります。

　とはいえ、タランチュラ星雲のようにできてから時間が経ち、充分に膨張した輝線星雲は内部の密度もかなり低くなっています。典型的には、電子や陽子が1㎤当たり1から10個程度しかありません。含まれる原子の数で比較すれば、地上での地球大気より18桁以上薄いことを意味しており、その中で宇宙船が受ける影響は、事実上、真空と同じです。

　ですから、内部に「高密度の」イオン乱流があったとしても、その直接の圧力で宇宙船が流されることはまず考えられません。七色星団でドメル将軍の乗艦が流される様子が描かれていますが、あれはイオン乱流に伴う電磁場の乱れが艦の姿勢制御系統を誤動作させ、操舵を不能にしたのではと私は推測しています。

　輝線星雲を形成する高温で重い星は、核融合反応が急速に進むため、宇宙規模での時間で言えばわずかと言える１００万年程度で超新星爆発を起こします。すると、その後には中性子星やブラックホールが残ります。より軽い星だともっと時間は要しますが、後には白色矮星が残ります。タランチュラ星雲の中に、Ｒ１３６より一世代前にできた星が残した中性子星や白色矮星が多数残っている可能性もないわけではありません。中性子や電子の縮退圧で支えられているこれらの星が星団をなしたものが七色星団の正体なのかもしれません。

ガミラス

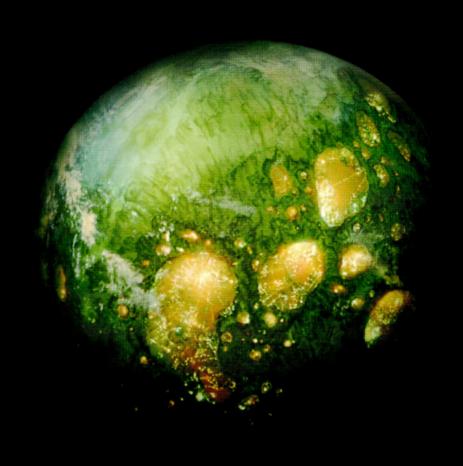
Gamilas

大ガミラスの首都がある惑星。緑の地表と複数の巨大な穴から見える黄色い地表が特徴的。

ガミラスはサレザー恒星系第４惑星。イスカンダルと二重惑星をなし、同じ軌道を回っています。岩盤でできた地表には、巨大な窪地が複数あり、それらは広大な地下空洞で相互に繋がっています。

惑星地形としてのガミラスの最大の特徴は地表が二重構造になっているともいえる点です。緑の外殻地表に対し、円形に近い窪地が多数あり、それらは底部が黄色く見えます。この地形は地球と全く異なるばかりでなく、イスカンダルともかなり異なっていてガミラス独特のものと言えます。

ガミラス表面で物体が落下する様子やガミラス人のヤマト艦内での動作の自然さなどから表面重力は地球とほぼ同じだと推定できます。天体の表面重力は惑星の質量と半径から計算できますが、太陽系の４つの岩石惑星、水星・金星・地球・火星を比べると大きくて重いほど表面重力が大きくなる傾向があります。したがって、質量も直径も地球とほぼ同じだとするのが自然でしょう。完全に同じならば、ガミラスの直径は1万2700㎞です。

これを手がかりにすると、ガミラスの巨大な窪地は、差し渡しが1500㎞から2500㎞だとわかります。最大のものは長径4500㎞ほども

ありますが、これは2つの窪地が繋がったもののようです。窪地の底面は比較的平坦で、水をたたえた海があります。
これとよく似た地形が火星にあります。火星にあるヘラス盆地は、直径2300㎞のほぼ円形の低地で周囲から最大9000mも陥没しています。巨大な隕石が衝突してできたクレーターだと考えられていて、火星に大量の水があった時代には広大な湖があったと推定されています。

ガミラスの地下空洞
外殻岩盤の地下は空洞になっていて、海や都市がある。

しかしながら、ガミラスの窪地は単なる盆地ではありません。広い範囲にわたって広大な地下空洞で相互に繋がっているのです。その天井は平らな岩盤層のようです。空洞の広さを考えると、極めて強固な岩石である必要があります。地球上で強いて似たものを探すと溶結凝灰岩が思い当たります。これは、火砕流の堆積物が大量に積み重なり、その下層が溶解・圧縮してできた岩盤です。日本では大隅半島で広範に見られます。

もしそうならば、ガミラスは広い範囲にわたって表面が火山灰に似た大量の粉砕物で分厚く覆われた時代があったことになります。全面が強烈に加熱圧縮された溶結凝灰岩で覆われた後、巨大隕石が衝突し多数の巨大クレーターができたというのがガミラスの基本的な地形の起源なのでしょうか。イスカンダル文明の過去を考えると、ガミラスで大規模破壊兵器が使用された疑いが出てきま

鹿児島県の花瀬自然公園
溶結凝灰岩でできているため、川床が平らな珍しい地形になっている。

す。

外殻の地表は緑色をしていますが、窪地から見た外殻岩盤の断面は褐色です。したがって、緑色は植物に覆われているためと考えるのが妥当でしょう。しかし、地球はそうではありません。緯度によって気候が大きく異なり、砂漠やツンドラなど植物がほとんど生えていない地域もかなりの面積を占めます。ガミラスの外側の地表には海もなく、地球と比べると雲も少ないようで、これだけの植物を維持するには水が足りないのではないでしょうか。

もしかしたら、破壊されたガミラス星を復活させるために惑星規模の植林がなされた結果で、その成果を保護するために都市は全てクレーターと、そこから掘り広げた地下空洞内だけに建設されたのではないでしょうか。これがガミラスの現在の姿なのかもしれません。

架空

イスカンダル

Iscandar

ガミラスと対をなす惑星。大きさも質量もガミラスとほぼ同じ。しかし、表面の様子は大きく異なる。

イスカンダルもサレザー恒星系第４惑星とされ、ガミラスと公転軌道を共有するものとして描かれています。青く輝くその表面はほぼ全面が海洋であり、陸地は列島状に並んだ島々しかありません。

ガミラスとは対照的に、イスカンダルはほとんどが海洋で覆われた惑星です。海面下の地形は画面からはよくわからないのですが、大小さまざまな島が列島状になっている特徴などからガミラスよりずっと地球に似た惑星であると予想できます。

世界地図を見ると、日本列島のように比較的細長い島々が、その伸びている方向に連なっている地形がいたるところにあることがわかります。これは地球の内部でマントルが対流していて、それによって地殻に皺が寄ったためだと考えると理解しやすいでしょう。

ここから類推するとイスカンダルにもマントルに対流があり、それによる造山運動で列島が形成されたと考えられます。

大陸がないのは、海水量の違いだけなのかもしれません。地球でも海面を１０００ｍほど上昇させた地図を作って見ると大部分が海中に没し、高い山脈だけが列島状に残った地形になり、イスカンダルと似た印象になります。

40年前の「宇宙戦艦ヤマト」では、ガミラスとイスカンダルは古くて寿命を迎えつつある惑星として描かれていました。当時は、惑星は高温の状態で誕生し、後は冷えるばかりだとする説が主流だったので、年老いた惑星という概念は比較的支持を得られる考え方だったようです。けれども、現在の天文学では惑星の寿命という概念はほとんど登場しません。

現在では、惑星の地殻変動や火山活動の原動力は惑星内部の放射性同位元素の崩壊熱だと考えるのが主流で

す。もちろん、これにも限界はありますが、それは恒星の寿命よりも長い可能性が高く、また、仮に地殻変動や火山活動が完全に停止しても惑星が壊れたり、それだけで短期間に環境が激変することは考えにくいからです。

とはいえ、文明の寿命となると全く別の話です。イスカンダルは文明としては既に寿命が尽きたかのような表現が作中では見られます。しかし、それは早計に過ぎるかもしれません。

スターシャは古代を兄の「墓」に連れて行きました。しかし、彼女は墓だとは一言も言っていないのです。古代の質問には「イスカンダルの人々は、この下に眠っています」と答えているだけなのです。実際、古代守は医学的には死んだかもしれませんが、その記憶や意識はシステムの中に保存されていました。ここから考えられるのは、墓地と思われているところは、実はイスカンダル人

イスカンダルの海
マザータワーに向かうヤマト。海面は高さが一定でない。ガミラスによる大きな潮汐があるためか？

の記憶保管庫なのではないかという疑いです。

イスカンダルでは何らかの理由で人々を生物として全て維持することが困難となり、全員を記憶や意識のデータとして凍結保存することを決定。これを維持管理するための人工知能を支援し、非常時に備えるために必要最低限の人員だけが惑星表面で生活します。そして、定期的にアーカイブ化された意識と交代する。そんな社会ではないのかと……。

生活するための肉体はクローンで、DNAは全て同じ。したがって、全員の顔や姿はそっくり。意識が戻った直後は副作用として子供っぽさが出やすくなるが肉体はクローンなので成人の姿。

これはあくまで私の勝手な妄想ですが、ここまで考えると、案外、本当のことかもしれません。森雪の存在も、この文脈で考えると、新しい物語を作ることが可能な気がします。

立ち並ぶは墓標?
水晶状の柱が数多く立ち並ぶここは、本当に墓地なのだろうか。

実在

二重惑星

Double Planet

互いに軌道を共有して公転している、同規模の惑星2個の組。こうした天体は惑星と呼べるのか？

二重惑星という表現はSFでは昔から比較的よく登場するものでしたが、日本で広く知られるようになったのは宇宙戦艦ヤマトのおかげでしょう。画像と共に衝撃を与える印象的な単語だったからです。

恒星と惑星、惑星と衛星の場合、多くの例では2天体の質量が大きく異なり、どちらがどちらの周りを回っていると表現するのが妥当なのかは議論の余地なく決まってしまいます。しかし、両者の質量が同程度の場合、一方だけが公転していると考えるのは実態とはかなり異なります。

恒星の場合には、ほぼ同じ質量の恒星2個以上が同じ点の周囲を回り合っている例が多数あり、これらは連星と呼ばれています。ですから、惑星同士の「連星」があってもよさそうです。

月が実際に太陽の周囲を（地球と共に）公転し

ている軌道は常に太陽に対して内向きの曲線です。冥王星とカロンの共通重心は2つの天体の間の空間です。なので、それぞれ二重惑星と呼ぶべきだという人もいました。しかし、国際天文学連合が惑星を定義した際にこの可能性はなくなりました。

ただし、この規定は太陽系に限られます。ですから、イスカンダルとガミラスを二重惑星と呼んでも何も問題はありません。

冥王星とカロン

ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した実画像。
(CDr. R. Albrecht, ESA/ESO Space Telescope European Coordinating Facility; NASA)

ラグランジュ点

Lagrangian Point

3つの天体の相互位置は変わらない場所。重力と力学を考えると答は5箇所しかない。

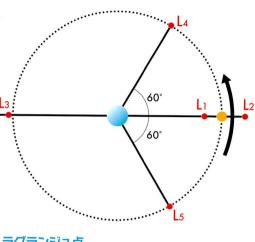
共通重心の回りを互いに円運動している2つの天体の周囲を、それらより桁違いに軽い物体が回っている場合、全ての力が釣り合って相対位置が変わらない点はどこか。その答えを示したのがオイラーとラグランジュです。

問題を少しでも簡単にするために、オイラーは重い2天体を結ぶ線上に限定して答を求めてみました。得られたのは、2天体の中間1カ所と、それぞれの星の背面に当たる各1カ所の合計3カ所

でした。中間に位置する点をL_1、2つの天体のうち軽い方の背面にある点をL_2、残りの点をL_3と呼びます（166ページ参照）。
　これらの点はいずれも、その点から2天体を結ぶ直線方向に外れると力の不釣り合いがどんどん拡大する不安定な点です。
　ラグランジュは、直線上の条件を外して探したところ、これ以外に2つの点を見つけました。
　いずれも2天体に対して正三角形をなす位置で、公転方向に対して前方を回転する点をL_4、後方を回転する点をL_5と呼びます。L_4とL_5は釣り合う点から外れても物体は、そこから大きく外れることがない点です（ただし、2天体の質量比が1に近いと不安定になります）。
　今では、これら5点を総称してラグランジュ点と呼んでいます。
　ラグランジュ点は力学の問題として数学的な興

第2バレラス
ガミラスとイスカンダルのL_1点に位置する宇宙都市。

味から得られたものでしたが、太陽系天体の観測が進むと、太陽と木星がなすL_4とL_5付近に小惑星が存在することがわかりました。これらはトロヤ群と呼ばれています。

ラグランジュ点

ある天体（青）の周囲をそれより少し軽い天体（黄）が公転している場合、両方の重力がバランスし、相対位置が変わらない点はL_1～L_5の5つある。

また、地球と月とがなすL_4とL_5は人類が利用するのに、いろいろと都合が良い位置であるため、宇宙植民ステーション（スペースコロニー）を設置するのに適しているとして、多くのSFやアニメに登場するようになります。

一方、L_1やL_2も研究を進めてみると、その周囲ではときどき軌道修正を加えれば、長期間にわたり、同じ場所に留まっていられることがわかりました。このため、太陽と地球がなすL_1には太陽観測衛星などが、L_2には赤外線天文衛星などが配置されるようになっています。

ガミラスとイスカンダルの場合、両者の質量がほぼ等しいので、L_1は両者の中間点になります。デスラー砲が最初に発射されたシーンを見ると、ガミラスの宇宙要塞である第二バレラスはL_1に位置することが映像と台詞で明確に示されています。

第六章
星巡る方舟とヤマトの超技術

実在

月

Moon

地球を巡る衛星であり、地球から最も近い天体。その存在は、様々な意味で計り知れない。

ロケットで打ち上げた人工衛星を除けば、地球の唯一の衛星です。地球に比べると、直径は４分の１強、質量は81分の１ですが、自分に比べてこれだけ大きな衛星を持つ惑星は太陽系では地球だけです。

餅つきする兎に例えられる月の模様は、いつも形が変わりません。月はいつも同じ面を地球に向けているのです。これは月が地球からの潮汐力で

る月面内惑星艦隊

変形し、月の自転周期が影響されて発生した現象です。同じことは冥王星でも起こっています。逆に月からの潮汐力で地球の海水面が変形します。これが潮の満ち干の原因です。

月の地形は地球に面している表と反対側の裏で全く異なります。表側は海と呼ばれる平坦な低地が多いのに対し、裏はほぼ全面的にクレーターで覆われています。海と呼ばれても水が溜まっているわけではなく、太古に流れ出した溶岩が固まった平原です。

月の表側（実画像）
普段、見慣れている月の表側。
©NASA/JPL

月の裏側（実画像）
月周回衛星「ルナー・リコネサンス・オービター」が撮影した月の裏側。右写真の月の表側と違い、クレーターで覆われている。
©NASA/Goddard/Arizona State University

月の表面重力は地球の6分の1しかありません。このため、文字通り地に足が付かず、普通に歩くのはむしろ困難です。月に行った米国の宇宙飛行士は跳ねるように歩き、その様子がテレビで放送されたので、月面歩行は一躍有名になりました。

月がどのようにしてできたかは、大昔からいろいろな説が考えられていました。けれども、1970年代に米国とソビエトの宇宙計画によって、大量の月の石が持ち帰られたことがきっかけで、そのいずれとも異なる巨大衝突説が提唱され、現在の主流となっています。

太陽系で惑星が形成されていた時代の末期、地球付近に残っていた最後の原始惑星が完成寸前の地球に深く衝突しました。原始惑星の本体は地球に飲み込まれ合体しますが、衝突の衝撃で地球の中心核を取り巻くマントルが大きくえぐられ、大量の岩石が軌道上にばらまかれました。衝突のエネルギーによって、そのかなりの量は一旦、溶解・気化してから軌道上で固化したかもしれません。軌道上に散らばった物質は、太陽系で微惑星から原始惑星や惑星ができたのとほぼ同じ過程を経て、最終的には1個の天体にまとまり、これが月になりました。

この説は、地球に比べて月が大きすぎる理由のほか、月の公転軌道面が地球の赤道面よりも黄道

月の形成
可視化：武田隆顕
シミュレーション：Robin M. Canup（Southwest Research Institute）（巨大衝突）
武田隆顕（月集積）

面（地球の公転軌道面）に近いこと、月の平均密度が地球のマントルの密度に近いことなどをうまく説明できます。

21世紀になると新たな発見がなされます。月の極地方の地下に氷がある兆候が見つかったのです。これが本当ならば月面に有人基地を作る際に大いに役立ちます。人間生活には水が欠かせないからです。基本的には循環使用するとしても漏れや蒸発分は補う必要があります。この発見以前には、月の岩石に含まれる結晶水（鉱物に分子レベルで内包されている水分）の利用すら検討されていました。

１９７０年代末にアポロ計画が終了して以来、月は行けそうで行けない天体となっています。現在、中国が有人月着陸を目指していますが、他には有力で継続的な計画はありません。米国は月探検や基地建設を何度か表明したものの、毎回、中止・撤回が続いています。月面に研究用の巨大望遠鏡を作る案やヘリウム3を回収して核融合燃料に使う案なども提唱されただけで現実的な計画にはなっていません。人類が再び月に立つ日は来るのか、それはどんな目的なのか。どの国が実現することになるとしても、人類の進歩に寄与するものであって欲しいですね。

アポロ11号

アポロ11号で月に行った際に宇宙飛行士が月の調査をしているようす。

©Neil Armstrong, Apollo 11 Crew, GRIN, NASA

不可視化

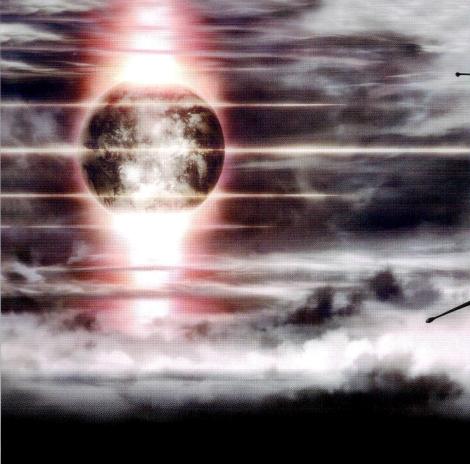
Stealth

超古代文明アケーリアス。星巡る方舟たる惑星シャンブロ一は、それ自体が不可視化されている。

今まで目にすることができなかった事物を目に見えるようにするのが可視化です。最近では「見える化」などとも言われます。それと逆に物理的に見えるものを見えなくするのが不可視化です。

物体を目撃することができるのは、その物体からの光を目が捉えるからです。これには、他の物体からの光を反射している場合と、物体自体が光を放っている場合とがあります。

前者の場合、光源を消せば見えなくなります。光が当たっても反射しなければ良いと考えれば、真っ黒に塗って当たった光を全て吸収するという方法も考えられます。特定の相手にだけ見えなくなれば良いと割り切れば、全ての

光を相手が居ないはずの方向にだけ反射することで目的を達することができます。現代のステルス戦闘機などは、この原理で敵のレーダーから不可視化を図っています。

自分自身が光らないようにするのは簡単そうですが、実はかなり難しい技術です。というのは、現在は光だけでなく赤外線や電波などでも敵を探知できるからです。物体が背景よりも温かいと、必ずより強い赤外線や電波を放ってしまいます。これを何とかしないと完全な不可視化は実現しません。

実在

ヤマトホテル

Yamato Hotel

古代たちが囚われた閉鎖空間。ホテルのような、そこをクルーはヤマトホテルと呼んだ。

謎の惑星の調査に赴いた古代たちは、そこで地球の古いホテルのような建物に閉じ込められてしまいます。しかし、様々な体験を通じて、その見かけが実態とは大きく異なることに次第に気付いていくのです。

実際に、ヤマトホテルと呼ばれた建物や設備は歴史的には2つあります。

1つは太平洋戦争時の戦艦大和それ自体です。排水量7万t級の戦艦大和は比較的スペースに余裕があり、比較的優雅に作られていました。太平洋を長期間にわたって遊弋（ゆうよく）することが想定されていたこともありますが、それまでの日本海軍の軍艦が資金や軍縮条約による制限から小さな艦体に兵器をぎっしり詰め込んだことと比べてしまったためかもしれません。

しかも、戦艦大和は戦争末期まで軍港などに停

泊したままのことが多かったため、「戦艦ではなくホテルだ」、として、「大和ホテル」と揶揄されていたのです。
もう1つの「ヤマトホテル」とは日本が満州地方に建設した豪華ホテルのブランドです。日露戦争の結果、満州地方の植民地支配権を得た日本は国策会社である南満州鉄道を設立。これが鉄道利用客の宿泊を主目的として沿線主要都市に建設したのが「ヤマトホテル」なのです。
欧米に日本の国力を見せつけようと西洋風の重厚な建物として建設され、その多くが今でも中国東北部に残っています。

実在

宇宙汎種説（パンスペルミア仮説）

Panspermia

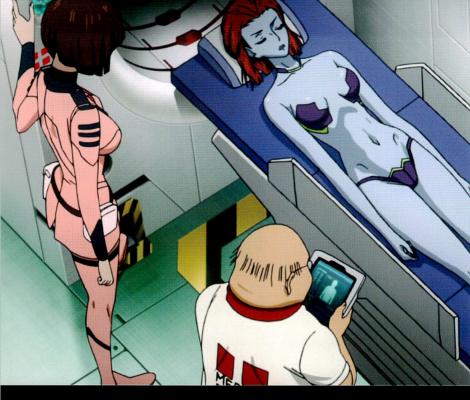
生命は宇宙で発生したとする仮説。これが正しければ、宇宙は同種の生命に溢れ、宇宙人は皆兄弟となる。

パンスペルミア説の証拠

ガミラス人も地球人も同種の生物。これは宇宙汎種説を裏付ける発見？

地球上で生命がどのように発生したのかは諸説あり、まだ決着はついていません。しかし、その1つとして、生命やその元となる物質は地球外から来たとする説があります。これが宇宙汎種説（パンスペルミアせつ）です。

地球には種々の生命が満ちあふれているのに、太陽系ですら他の天体で生命は痕跡すら見つかっていません。このため、生命の発生の場は地球上だとするのが今も主流です。

しかし、地上発生説の根拠の1つであるミラーの実験も疑問が持たれるようになっています。原始地球の様子についての研究が進むと、実験当時の予想とは大気組成が大きく異なることがわかっ

たからです。
しかも、暗黒星雲や赤色巨星の周囲を電波や赤外線で観測すると、事前の予想以上に複雑な分子があることがわかり、生命の起源となり得る物質は宇宙空間にも豊富にあるという証拠が集まりつつあります。太陽系内では、探査機が持ち帰った彗星の尾の中の物質からタンパク質やＤＮＡの構成要素であるアミノ酸も見つかっています。
これらの発見によって、当初は単純な発想から提唱されていた宇宙汎種説も証拠に裏付けられた説として支持する科学者が増えています。
宇宙は真空だと言われます。確かに、空気抵抗や気流で天体の運動は変わりませんし、宇宙服なしで宇宙船外に出ると窒息して死んでしまいます。しかし、宇宙は決して完全な真空ではないのです。希薄ながら漂っているガスがあり、これを星間ガスと呼びます。

星間ガスは地球の大気と比べると桁違いに薄く、1気圧の地球大気1cm^3に含まれる気体分子の数が、1km^3程度にまで広がっているという濃さしかありません。しかし、宇宙空間は太陽系全体と比べても桁違いに広いため、ガスの総量は決して無視することはできないのです。

星間ガスは場所によって濃さや状態が異なります。希薄で高温ガスの中には、それよりは濃くて低温のガスがまとまって存在し、ここを地球大気中の雲になぞらえて星間ガス雲といいます。その一部は暗黒星雲として可視光で捉えることもできます。

星間ガス雲の特に濃いところや大量の塵ができていると考えられる赤色巨星の周囲を電波で観測すると、それ以前の予想に反して、多数の原子が集まってできる複雑な分子が検出されることが、1980年代以降、多数発見されるようになりました。その中には有機物と呼ばれる生命現象と関連深い複雑な分子もありました。

1999年に打ち上げられ、ビルト第二彗星に接近した米国の探査機「スターダスト」は彗星の尾に含まれる塵を2011年に地球に持ち帰ります。それを分析した結果、彗星の尾にはグリシンやεアミノカプロ酸、エタノールアミンなど種々の有機物を含んでいることがわかったのです。

とはいえ、宇宙空間でどこまで生命に近いといえる物質が作られるのかは未だわかっていません。宇宙空間で形成された有機物がそれを含んだ彗星ごと原始地球に落下し、それがきっかけで生命の誕生に繋がった。こんな折衷案の説もかなり説得力を持ちます。この場合、生命誕生の条件が整っている惑星があれば、ほとんどどこでも同じようなアミノ酸で構成された生命が誕生する可能性大です。

ただし、その場合でも、異なる星に住む知的な

宇宙人のＤＮＡが完全に同じというのは考えにくいでしょう。「宇宙戦艦ヤマト２１９９」でもビーメラ４の宇宙人は明らかに地球人とは異なった生き物でした。ガミラス人と地球人とがＤＮＡも同じというならば、何か理由が必要でしょう。瓜二つの人間が同世代に何組もいるとなるとなればなおさらです。そのヒントは物語りで登場する惑星シャンブローにあるようです。

宇宙戦艦ヤマト2199に登場する主な異星人

ビーメラ星人を除くと極めて似た生物だ。彼らも地球人と同じ DNA 配列だとしたら、それは偶然か必然か？　上からオルタリア人、ザルツ人（中央の女の子）。

架空

オムシス

O・M・C・S(Organic Material Cycle System)

狭い宇宙船内で長い期間、食料を自給するための鍵となる技術。原料は知らない方がいいというが…。

ヤマトのイスカンダルへの航海を成功させた技術の1つにはオムシスも挙げられます。惑星と比べれば桁違いに狭い環境で限られた食糧資源をどう有効利用するか。その答となる技術です。

我々が日常目にする様々な物質は90種類あまりの元素の組み合わせでできています。特に、食料となる物質は、我々の身体を構成する物質と元素で比べればほとんど同じものからなります。もちろん、身体から出る垢や排泄物に含まれる元素も同じです。

そこで、人間が生活する際に排出される物質、特に有機物を回収し、物質を原子レベルに分解して再構成し、食料を作り出す装置がオムシスなのです。ビーメラ4付

宇宙船内の食堂
宇宙船内ではいろいろなメニューが食べられる。マゼランパフェも人気。

オムシス不調
オムシスが故障すると、シャワーも使用できなくなる。

近でオムシスが不調となった際のシーンでは、シャワー室に使用禁止の掲示がありました。

原理や機能を考えると、オムシスは食料だけでなく、呼気中の二酸化炭素から炭素を取り出し、食料の原料として利用し、残った酸素を新鮮な空気として供給するシステムでもあると予想できます。

このような装置は今でも製造可能ですが、食料だけに絶対の安全性が必要なのと、通常の方法で食料を作る方が惑星上ではずっと低コストなので、実用化は先のことでしょう。

架空

慣性制御

Inertia Control

重力を、そして、慣性質量も自在に操る超技術。ワープに匹敵する、それは地球人が独自開発したらしい。

「宇宙戦艦ヤマト2199」の超技術というとワープと波動砲に目が行きがちですが、それに匹敵する重大な革新技術が慣性制御です。ヤマトだけではなく、キリシマほか多くの地球の宇宙艦船に搭載されていたようです。

ヤマト艦内で働いている重力は機械装置により人為的に作られたもので、第3艦橋で慣性制御に問題が起こると艦内は無重力になってしまいます。逆に、ファルコンの格納庫は立体的に利用するために慣性制御が及ばないようになっているとの描写があります。とはいえ、慣性制御の機能はそれだけではないようです。

ヤマト抜錨の際には、強烈な噴射もなく、艦体がフワリと浮かび上がっています。キリシマが古代と島を回収して地球に戻る際にも緩やかに着陸していきました。これらは地球の重力を制御する

慣性制御

ヤマト艦内の重力は人為的に制御されている。

技術の存在を思わせます。
２つの物体間には重力が働き、その強さは双方の質量の積に比例します。なので、なんらかの方法で一方の物体の質量を増減させられれば、事実上、重力を操ることができます。
そう考えると、艦内の重力制御と艦をフワリと浮かべる技術とは原理的に同じだと推定できます。それが慣性制御なのです。
慣性制御の機能は、そればかりに留まりません。質量は物体の運動の鈍さにも関係するからです。
一定の質量の物体に力を加えると、その方向に、力の強さに比例した大きさの速度変化が生じます。ニュートンが実験から得た、この結論をニュートンの力学の法則と言います。
物理法則というと難しそうですが、これは日常的にも経験することです。スーパーで商品を満載したカートを動かそうと力を加えてもカートは

徐々にしか加速しません。また、勢いが付いたカートを止めようとしても積んだ荷物が重ければ簡単には止まってくれません。進んでいるカートの進行方向を変えようとした場合も同じです。

では、慣性制御で物体の慣性を変えることができたらどうなるでしょうか？

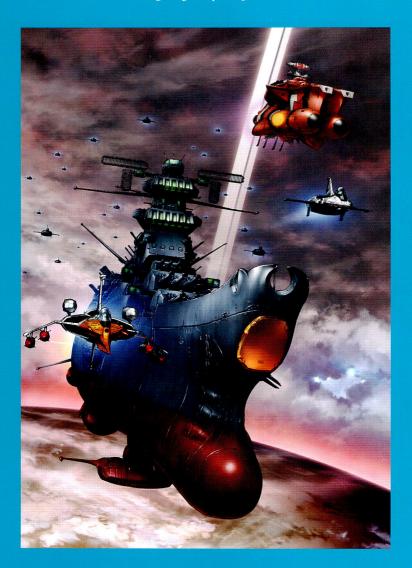
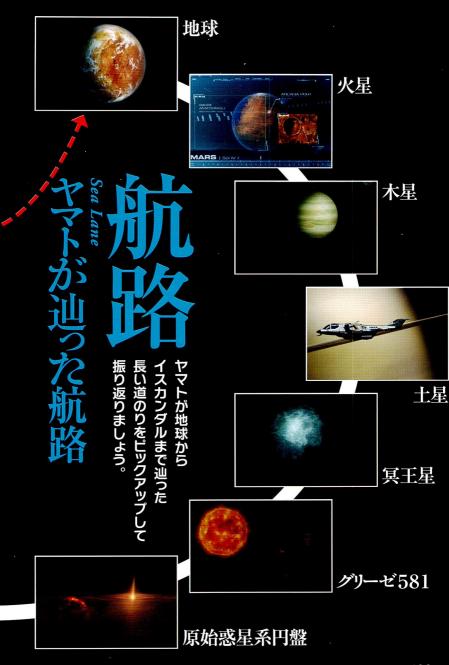
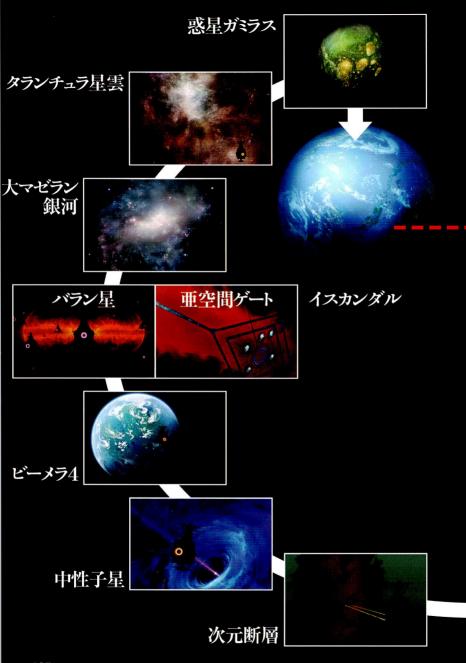
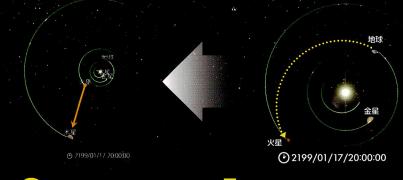
運動を変化させる際に質量を小さくしておけば、同じ力で物体の速度を素速く変化させることができます。つまり、急加速・急減速・急回転が可能となるのです。これは戦闘艦の機能として重要です。冥王星沖海戦での地球艦隊の動きを見ると、これが働いているのではと思わせるシーンがあります。

慣性制御で重力が操れるなら、質量を負にすることで反重力が得られると考える人も多いでしょう。ところが、そうは問屋が卸しません。質量は重力と同時に力学の法則にも登場しているからです。質量を負にしたならば重力は上向きに働きます。しかし、質量が負であるということは力が加わる向きとは逆向きに加速が起こることになります。つまり、この場合でも加速は下向きなのです。ヤマト抜錨の際には、艦体の質量を極めて小さくしてから小出力のエンジンで離陸したのではと私は推測しています。

慣性制御をどうやれば実現できるのかについては、現在の科学ではほとんど手がかりがありません。しかし、質量についての研究が進めばヒントはつかめるかもしれません。質量の起源がヒッグス粒子のためらしいという研究結果が得られたのは、ほんの数年前のことです。だからといって直ちに慣性制御が可能になるかがわかるわけではありませんが、人類の科学知識が増えれば、いずれ慣性制御を実現する方法が見つかるかもしれません。

付録

航路
Sea Lane
ヤマトが辿った航路
ヤマトが地球から
イスカンダルまで辿った
長い道のりをピックアップして
振り返りましょう。
地球
火星
ARCADIA PORT
AMATERASU
MARS (Sol IV)
木星
土星
UNCF
冥王星
グリーゼ581
原始惑星系円盤

惑星ガミラス
タランチュラ星雲
大マゼラン
銀河
バラン星
亜空間ゲート
イスカンダル
ビーメラ4
中性子星
次元断層

2 火星から木星へワープ!

1 ヤマトは地球から火星へ!

Image: UNIVIEW　航路図作図協力：株式会社オリハルコンテクノロジーズ／高幣俊之

天文学的ヤマト航路

ポルックス

太陽系から脱出し、シリウスを通り、
グリーゼ581、大マゼラン銀河へ進む!

プロキオン

ケンタウルス座アルファ星

シリウス

バラン、大マゼラン銀河へ

エリダヌス座イプシロン星

天王星

4 土星から冥王星へ!

3 木星から土星へ!

宇宙戦艦ヤマトが進んだ航路で、天文学的にはっきりしている箇所をプレイバック。

グリーゼ581

ベガ

BD+59°1915

太陽

ケ

アルタイル

はくちょう座61番星

インディアン座イプシロン星

10光年

Image：Hipp Liner

あとがき

大マゼラン銀河までの旅を終え、地球に戻って来たこの時点で旅路を振り返ると、言い残したことがまだまだあることに気付きます。

天の川銀河は直径10万光年、そこには1000億ほどの恒星があると言われています。1995年に最初の太陽系外惑星が発見されるまでは、そのうちでも惑星を持つものは少ないのではないかとの予想をする天文学者がかなりいました。しかし、その後の発見の歴史から、今ではほとんど全ての恒星には惑星が巡っていると思う人がかなりの数に上っています。

この事実を踏まえると、天の川銀河の中にある多彩な恒星や惑星についても解説したいとの欲望がモリモリと湧いてきます。天の川銀河の中については、「宇宙戦艦ヤマト2199」では、全体の4分の1程度の時間しか割かれていませんでしたが、ぜひ、ここを克

明に描く話を作ってくれないか、ヤマトのファンとしては、そんなシリーズもぜひ見てみたいと思ってしまいます。

特に私の専門である、星形成領域や天の川銀河の中心部など、太陽系近傍とは（天文学的に言うと）著しく異なった状況の宇宙のことを考えると、そのような環境下でのヤマトの活躍、そこでのガミラスとの戦いを見てみたいという思いが強く生じます。この夢は、いつか叶う日が来ると期待しています。「宇宙戦艦ヤマト」を見てから、40年経った今日、わずかばかりとは言え、「宇宙戦艦ヤマト２１９９」の制作に参加することができたのですから。

とはいえ、人間活動の成果である以上、科学の予想にも限りがあります。太陽系外惑星の発見の歴史を見るだけでも、現実の宇宙は人間の予想を超えるものがあります。もちろん、各時代の科学者はベストを尽くして、科学的事実を見出そうと日夜努力を積み重ねているわけですが、自然界はそれほど簡単には正体を明かしてくれません。また、知恵を尽くしたはずでも、必ず考え落としがあり、実験や観測を重ねると、そのことを思い知らされることはよくあります。そのような困難を乗り越えてでも、宇宙の謎を解き明かしたい、宇宙の全てを説明したいとするのは人間の根本的な望みではないでしょうか。

「宇宙の全ては説明できるべきである。」これは人類が持つべきスローガンです。もちろん、現時点では説明できないことは多々あります。遠い将来に至っても全てが説明できる日は決して来ないでしょう。しかし、完全解明を目指して少しずつでも努力する。その過程が大事であり、前進しようとする意志こそ科学なのです。

こうした進歩のための努力が、いつかはワープエンジンを開発し、大マゼラン銀河へと旅立つ日を実現するのだと私は信じています。たとえ、ガミラスの攻撃やイスカンダルの技術支援がなくとも。

半田利弘

著者プロフィール

半田利弘
（はんだ・としひろ）

「宇宙戦艦ヤマト2199」の科学考証担当。鹿児島大学大学院理工学研究科・理学部物理科学科教授。早稲田大学理工学部物理学科卒、東京大学大学院理学系研究科天文学専門課程修了。理学博士。専門は電波天文学。電波観測によって、天の川銀河や他の銀河の星間物質の状態と構造の関係について研究している。天文学普及活動も積極的に行っており、ヤマトを天文学的視点で見る講演会のほか、企画展の監修も行っている。『月刊天文ガイド』（誠文堂新光社）に長期にわたり連載中 。主な著者に『基礎からわかる天文学』（誠文堂新光社）など。

著作総監修：西崎彰司
監修協力：ボイジャーホールディングス
画像協力：プロダクション I.G
株式会社 東北新社

イラスト／有留ハルカ
デザイン／永井秀之
ＤＴＰ／プラスアルファ

イスカンダルへの航海(こうかい)で明(あ)かされる宇宙(うちゅう)のしくみ

宇宙戦艦(うちゅうせんかん)ヤマト2199でわかる天文学(てんもんがく)

NDC440

2014年12月16日　発行

著　者　半田利弘(はんだとしひろ)
発行者　小川雄一
発行所　株式会社 誠文堂新光社
〒113-0033　東京都文京区本郷3-3-11
（編集）03-5800-5779
（販売）03-5800-5780
http://www.seibundo-shinkosha.net/
印刷所　星野精版印刷 株式会社
製本所　和光堂 株式会社

ISBN978-4-416-11478-0